Architectures de sécurité pour Internet

Protocoles, standards et déploiement

Jean-Guillaume Dumas
Professeur à l'université de Grenoble-Alpes
Pascal Lafourcade
Maître de conférences, HDR à l'université Auvergne Clermont
Patrick Redon
Expert en cybersécurité

Préface de Guillaume Poupard

2e édition

DUNOD

Toutes les marques citées dans cet ouvrage
sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

Illustration de couverture : © Alex – Adobe Stock

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081258-5

Préface

Corollaire indispensable au fantastique développement du numérique, la sécurité des systèmes d'information est passée en quelques années du rang d'une discipline confidentielle – portée par des domaines d'expertise tels que la cryptologie – à un sujet majeur dont les médias se font l'écho au rythme des attaques informatiques qui ne laissent pas d'inquiéter par leur impact toujours plus grand. L'informatique est partout, là où nous nous y sommes habitués, là où elle est bien visible, mais également enfouie dans la plupart des systèmes industriels. Ce que certains qualifient déjà de quatrième révolution industrielle est une source formidable de gains de productivité, de compétitivité, d'innovation mais les faiblesses induites sont, si nous n'y prenons pas garde, particulièrement préoccupantes.

Ces dernières années ont vu se développer les attaques portées par une cybercriminalité en plein essor. Les escroqueries numériques en tout genre sont devenues une activité particulièrement lucrative et, objectivement, peu risquée pour le moment. Les atteintes à l'image numérique, notamment au travers du « défacement » de sites Internet, sont devenues courantes. Plus graves encore, bien que beaucoup plus discrètes par essence, les intrusions dans les systèmes d'information à des fins de renseignement sont une véritable calamité pour l'économie, mais également pour la protection des données à caractère personnel. Les attaquants sont toujours plus compétents, mieux organisés, plus spécialisés et il est bien difficile de dresser un bilan fiable des conséquences catastrophiques de cette perte d'information stratégique. Enfin, bien qu'heureusement encore rare, le risque majeur des années à venir est le sabotage pur et simple des systèmes au moyen de cyberattaques. La technologie le permet, les motivations sont là, le pire est à venir si nous n'y prenons pas garde collectivement.

Face à ce constat réaliste bien qu'anxiogène, les solutions existent et sont abordables. Il convient tout d'abord de faire face, de ne pas nier le risque. Il faut ensuite accepter de conduire une véritable analyse de la menace : que faut-il protéger, contre quoi, à quel niveau. Enfin, la sécurité doit être intégrée au plus profond de nos systèmes selon trois axes majeurs : la protection, la défense et l'humain. La protection tout d'abord : les systèmes d'information doivent être conçus en tenant compte de principes de sécurité informatique dès leur conception. La sécurité influence l'architecture même des réseaux qui doivent être segmentés et interconnectés en positionnant les bonnes barrières aux bons endroits. La défense ensuite : quelle que soit la qualité des mécanismes de protection, il faut toujours considérer qu'un attaquant, qui peut d'ailleurs être interne à l'organisation, peut réussir à les contourner. Être capable de détecter au plus tôt de telles attaques pour réagir efficacement est indispensable afin

de fortement limiter les conséquences. L'humain enfin : ce facteur est trop souvent négligé dans le cadre d'une approche trop technique des questions de sécurité. L'homme fait partie intégrante des systèmes d'information et, s'il n'est pas formé de manière adaptée, il peut rapidement en être le maillon faible.
Afin d'implémenter cette doctrine, la tâche est immense et nécessite une collaboration de l'ensemble des acteurs qu'ils soient publics ou privés, experts en sécurité ou utilisateurs. En France, l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information est l'autorité nationale de défense et de sécurité. Elle coordonne l'action des différents ministères et développe un écosystème à même de proposer des solutions de sécurité pour protéger au juste niveau les systèmes informatiques. Sans passer en revue les nombreux axes de développement, citons cependant la démarche de qualification qui vise à évaluer les produits ainsi que les prestataires de services de sécurité de manière à proposer à ceux qui veulent se défendre des solutions à la fois efficaces et de confiance, deux notions bien distinctes.

Mais la sécurité des systèmes d'information, ce n'est pas seulement une froide discipline technologique indispensable dans un contexte de plus en plus hostile ; c'est avant tout un domaine absolument passionnant, fruit de la rencontre entre de nombreuses disciplines scientifiques et humaines.
Alors étudiant, j'ai découvert ce sujet par hasard, au détour d'un exercice d'algèbre introduisant le concept de cryptographie asymétrique avec le fameux RSA. Ce principe m'a fasciné et, lorsqu'il m'a été permis de faire une thèse de doctorat, je me suis orienté vers la cryptographie asymétrique, une discipline où la théorie et la pratique se rejoignent si naturellement.
Cet ouvrage vous propose un voyage dans les arcanes d'une discipline qui sous-tend la sécurité de la majorité de nos systèmes d'information, une discipline complexe, subtile, difficile à implémenter, mais dont la maîtrise est indispensable à ceux qui veulent vraiment comprendre comment la cybersécurité moderne peut apporter des réponses efficaces à des problèmes d'apparence pourtant insolubles.
Bonne lecture !

Guillaume Poupard
Directeur général de l'Agence nationale
de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI)

Table des matières

Avant-propos

« *La nécessité est mère de l'invention.* »
Platon (428-348 av. J.-C.), *La République*, II

Ce livre s'adresse aux étudiants en master en sécurité ou en informatique, aux enseignants, chercheurs et ingénieurs en sécurité souhaitant comprendre ou approfondir leurs connaissances des infrastructures de gestion de clefs (« *Public Key Infrastructure* »).
Il est le résultat de la collaboration des mondes universitaires et industriels et de nombreuses années d'enseignement dans les cours de masters liés à la sécurité de Clermont-Ferrand et de Grenoble (master SCCI, master en apprentissage SAFE) dans lesquels les auteurs ont le plaisir d'enseigner.
Son objectif est de fournir une approche compréhensible des techniques, technologies et enjeux liés à ces infrastructures, leur mise en œuvre, ainsi que les services et protocoles associés.
Plus d'une centaine de figures accompagnent la lecture des chapitres et chaque chapitre inclut des exercices corrigés pour aider le lecteur dans l'assimilation et l'approfondissement des concepts. Cet ouvrage est aussi structuré de manière à ce que chaque chapitre puisse être lu séparément, en veillant à définir l'ensemble des termes utilisés. De plus, les prérequis nécessaires à sa compréhension sont rappelés.

Objectif de l'ouvrage

Le livre est organisé de manière à donner un aperçu général de tout ce qui concerne la cryptographie à clef publique et plus particulièrement des infrastructures de gestion de clefs (IGC, ou « *Public Key Infrastructure* », PKI) nécessaires à la mise en œuvre de cette cryptographie. Il présente ensuite un panorama des techniques et protocoles permettant de réaliser des communications sûres, de X.509 à Bitcoin. Il est organisé autour de quatre principaux axes :

— une présentation des principaux standards d'architectures : « *PKI for X.509 certificates* » (PKIX), « *Pretty Good Privacy* » (PGP) et les architectures reposant sur l'identité ou les blockchains. PKIX est le type d'architecture aujourd'hui le plus largement déployé pour un usage professionnel au quotidien. Son architecture centralisée permet de l'enrichir de services et de soutiens au déploiement, apportant ainsi un usage relativement transparent pour les utilisateurs. Différemment, PGP est très utilisé pour des usages décentralisés où

la confiance s'acquiert par des moyens externes à la « *Public Key Infrastructure* » (PKI) ;
— un point de vue pratique complémentaire aux aspects théoriques : tout d'abord par des tutoriels détaillant la mise en œuvre d'outils librement disponibles tels GPG ou OpenSSL puis par un exposé des problématiques de déploiement industriel d'infrastructures. En particulier, que l'infrastructure soit à destination d'utilisateurs externes ou internes à l'entreprise mettant en œuvre la PKI, elle est nécessairement accompagnée de documents et procédures décrivant d'une part, l'architecture et les moyens mis en œuvre dans la PKI et d'autre part, les moyens organisationnels nécessaires à la bonne marche de la PKI ;
— un point de vue de mise en œuvre dans la sécurisation des communications : c'est-à-dire par un exposé de l'utilisation des PKI dans la sécurisation des échanges et des différentes couches réseaux ou applicatives nécessaires aux communications sur Internet : de IPSec, SSL/TLS, HTTPS, DNSSec pour le réseau, à S/MIME, monkeysphere et OTR pour la messagerie électronique, du fonctionnement des cartes bancaires, à SET ou Bitcoin pour les transactions ;
— enfin, le livre traite des normes et de la réglementation en sécurité associées à l'emploi et à la mise en œuvre d'une PKI, tels les Critères Communs, le FIPS−140 ou encore le Référentiel Général de Sécurité émis par l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information.

Pour la seconde édition, l'ouvrage a été actualisé en intégrant des techniques récentes, comme les blockchains, les infrastructures de gestion des identités ou le système de transactions eIDAS. L'utilisation de blockchains en tant qu'architecture de sécurité à part entière par exemple est dorénavant abordée, et le règlement européen eIDAS dans son ensemble, tout comme le RGPD, sont détaillés. Plusieurs autres parties ont également été mises à jour, incluant l'application OpenKeychain pour la messagerie sécurisée sous Android, l'essor des cryptomonnaies, des détails sur les signatures et les serveurs de clefs PGP, les standards d'encapsulation de clefs, ou encore la généralisation de l'usage de connexions sécurisées sur Internet grâce au projet « *Let's Encrypt* ».

Organisation

Le chapitre 1 présente le problème principal résolu par les architectures à clefs publiques, à savoir l'échange de clefs, ainsi que les insuffisances des échanges de clefs classiques que sont le protocole de Diffie-Hellman et le système Kerberos. Comme dans toute étude de cryptologie, l'étude de l'histoire est fondamentale car elle permet de connaître l'historique des attaques ainsi que l'intérêt et le principe des contre-mesures.
Le chapitre 2 pose ensuite les fondations techniques indispensables à une architecture : les annuaires et les signatures électroniques. Ce chapitre présente également les notations et standards classiques du domaine. Le lecteur averti pourra utiliser ce chapitre tout au long de sa lecture.
Le chapitre 3 introduit les fondements de la gestion de clefs et des certificats électroniques. Trois organisations générales d'une architecture asymétrique sont ensuite présentées.

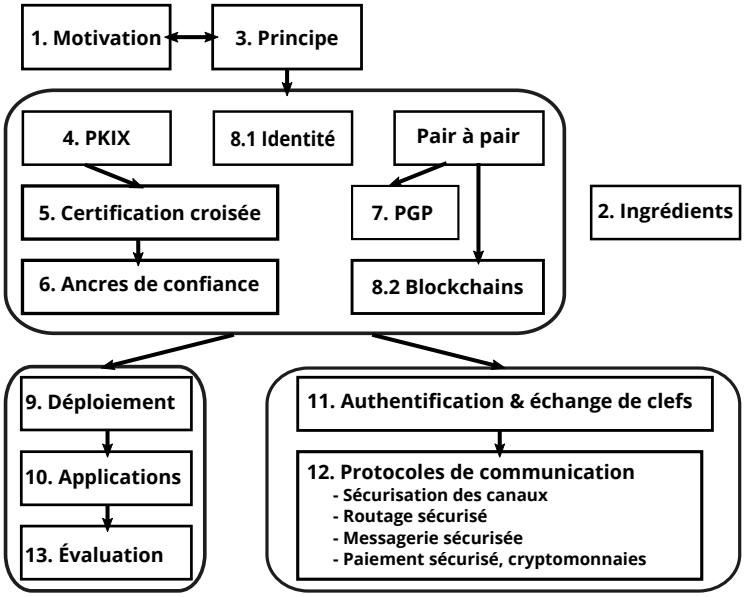


FIGURE 1 – Schéma des dépendances entre les chapitres du livre.

Un premier type d'organisation possible, qui est hiérarchique, est décrite en détail aux chapitres 4, 5 et 6. C'est la plus répandue et la plus adaptée aux entreprises commerciales par exemple. Plus précisément, le chapitre 4 décrit le standard PKIX, le chapitre 5, les méthodes de certifications croisées et de confiance distribuée et le chapitre 6 présente les mécanismes de confiance pour le modèle embarqué, dans les systèmes d'exploitation et les navigateurs Internet. Le deuxième type d'organisation possible est une organisation pair-à-pair sans autorité centrale, dont l'archétype est le système PGP qui est détaillé au chapitre 7. Dans le chapitre 8 sont présentées des architectures moins répandues qui permettent, comme dans le cas de Spooky, de généraliser le concept d'attribution de clefs à l'attribution de permissions ou encore d'utiliser l'identité des personnes comme clef publique. Ce chapitre clot la première partie du livre, sur les principes des architectures.

La deuxième partie aborde les aspects pratiques comme le déploiement et l'évaluation de la sécurité. Les chapitres 9 et 10 exposent comment définir une politique de sécurité, déployer sa propre architecture et donnent des exemples d'outils permettant de mettre en place une PKI pour les principaux types d'organisation et de systèmes d'exploitation. Le chapitre 11 donne les standards de base sécurisés par une PKI pour l'authentification, le transport et l'échange de clef.

Le cœur de la deuxième partie se trouve au chapitre 12 qui montre les mécanismes techniques mis en place pour la sécurisation des communications du Web en utilisant les PKI. Il brosse ainsi un panorama de la sécurité Internet, des couches réseaux aux paiements en ligne, en passant par les mails chiffrés.

Enfin, le chapitre 13 explique comment les PKI permettent de faire de la certification et présente le cadre réglementaire français associé.

Pour clarifier l'utilité et la lecture possible de ces différents chapitres, la figure 1 les représente avec leurs dépendances et la figure 2 illustre les différents protocoles étudiés dans la suite du livre et leurs interactions avec différents acteurs majeurs de la confiance numérique.

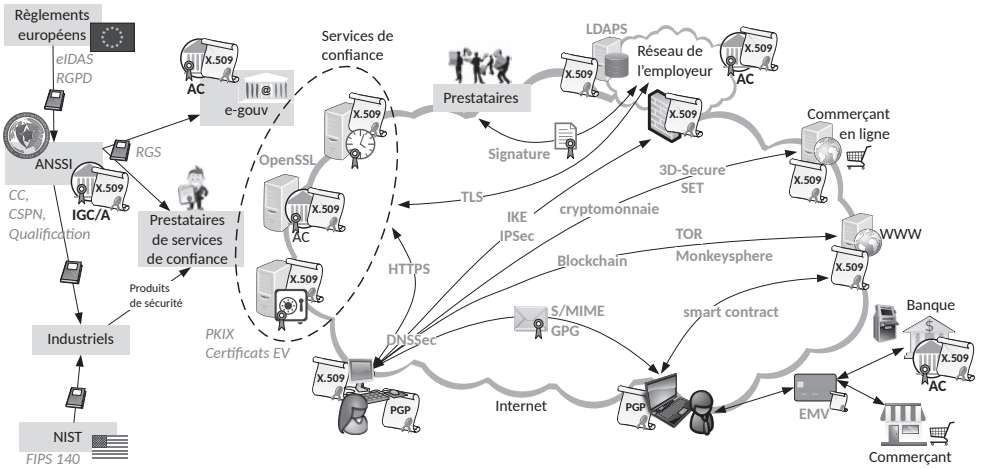


FIGURE 2 – Principaux protocoles étudiés dans *Architectures PKI et communications sécurisées*.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANSSI, le CNES, OpenTrust et Thales d'avoir accepté la reproduction de documents et d'images. Par ailleurs, de nombreuses images utilisées dans les illustrations proviennent du site `openclipart.org`.
Un grand merci également à Brice BOYER, Dominique DUVAL et Sébastien VARRETTE, ainsi qu'à Laurent FOUSSE et son serveur Git, pour leurs contributions à l'élaboration du contenu de ce livre. Merci aussi à Joshva BELLAMINE, Christophe BLAD, Jérôme CLERY, Jean-Marie COLLEU, Thierry HASSON, Vladimir KSINANT, Bruno RICCI et Valérie ZORZI pour leurs retours d'expérience sur la mise en œuvre des infrastructures de gestion de clefs et sur la réglementation, permettant d'enrichir le livre avec une vision pratique.
Enfin les auteurs expriment leur gratitude à Floriance ALIXE, Maud BILLETTE, Guénaëlle DE JULIS, David DELON, William DURAND et Jean-Baptiste ORFILA pour leurs commentaires et suggestions de modifications constructifs, à la suite de leurs relectures assidues.

Grenoble, Aubière, Nantes, le 24 janvier 2020.
Jean-Guillaume DUMAS, Pascal LAFOURCADE, Patrick REDON.

Introduction

L'échange d'informations *sensibles* est une problématique intemporelle. Ces informations peuvent être à caractère confidentiel ou nécessiter d'être authentifiées. Indépendamment du support et des moyens d'échanges de ces informations, il est nécessaire d'assurer leur sécurité. Dans le monde actuel, les exemples de telles informations sont nombreux. Dans un contrat, la signature, les paraphes et la conservation d'une copie par les parties garantissent l'authenticité et l'intégrité de son contenu. De plus, les informations à caractère personnel transmises à un avocat, à un notaire ou à une administration sont des informations confidentielles, au même titre que des données militaires stratégiques.

L'informatique et la dématérialisation ont apporté un média supplémentaire aux échanges. L'essor du réseau Internet et les innovations technologiques entraînent une évolution dans les modes de communication et de consommation. Ordinateurs, téléphones mobiles, tablettes, objets communicants, etc. sont omniprésents. Il est désormais possible, à tout moment, de faire des achats dans une boutique virtuelle, de jouer ou de discuter avec une personne située partout dans le monde, ou encore d'envoyer des documents électroniques. Les échanges sous-jacents à ces services sont gérés par des protocoles de communication complexes que l'utilisateur ne contrôle pas ou très peu alors même qu'ils peuvent nécessiter l'envoi sur le réseau d'informations sensibles ou à caractère personnel, telles un numéro de compte ou de carte bancaire. Les moyens techniques garantissant la sécurité de ces échanges reposent sur la cryptographie. Jusqu'à la naissance de la cryptographie moderne, la protection des informations ne tenait principalement compte que de la confidentialité, et seule la cryptographie symétrique, utilisant des clef secrètes partagées, était employée. Parmi les exemples connus, il y a le code de César, le code de Vigenère et la machine ENIGMA. Les cinquante dernières années ont vu émerger l'étude de nouvelles tendances ajoutant les protections en intégrité et authenticité, cette dernière devenant aussi importante que la confidentialité. Ceci est particulièrement vrai dans le commerce électronique. Dans ce domaine, il faut par exemple pouvoir prouver que la commande vient bien de la personne à qui la livraison est destinée mais aussi certifier des actes authentiques comme des contrats.

L'authentification est le mécanisme de validation de l'identité d'une personne ou d'une entité : *authentifier* c'est être capable de relier de manière certaine une identité et un identifiant connu. Pour cela, des chiffrements asymétriques avec des clefs secrètes aussi appelées des clefs privées, pour déchiffrer ou signer et des clefs publiques pour chiffrer ou vérifier la signature sont utilisées. L'accès aux identifiants et données d'authen-

tification des participants est fait grâce à des annuaires électroniques à authenticité garantie. Dans ces annuaires, pierre angulaire des solutions de sécurité présentées dans cet ouvrage, des certificats électroniques permettent de retrouver les identifiants d'une personne donnée.
Cette authentification est de nos jours omniprésente, tout en étant transparente pour les utilisateurs. Citons par exemple le système EMV (Europay, Mastercard, Visa) sécurisant les transactions embarquées sur les cartes à puce. Une infrastructure à clefs publiques/privées permet aux cartes de s'authentifier auprès des distributeurs de billets par exemple et la garantie d'identité est donnée par une communication avec la banque et/ou le groupement d'intérêt économique. Un autre exemple est le protocole HTTPS qui permet à un site Internet de s'authentifier auprès de notre navigateur afin d'éviter les attaques par hameçonnage (le « *phishing* ») où un site Internet escroc essaie de se faire passer pour un autre afin de récupérer des informations confidentielles. Là encore une architecture à clefs publiques/privées garantit l'identité des sites Internet. Par exemple, il suffit de cliquer sur le cadenas situé à côté de l'adresse sécurisée par HTTPS pour obtenir des informations sur les organismes, ou entreprises, spécialisés dans les architectures à clefs publiques qui garantissent l'identité du site en question.
Compte tenu de la croissance du nombre d'objets connectés, mais également de l'augmentation des cyber-attaques, la sécurité des communications est devenue une nécessité. Le présent ouvrage décrit les principales solutions déployées aujourd'hui, avec leurs forces et leurs faiblesses. Le monde est à l'aube de la troisième évolution de l'Internet qui, après le Web social, doit combiner le Web sémantique avec le Web des objets. Il est toujours difficile de prévoir ou de prédire, une chose est cependant acquise, cette évolution ne se fera pas sans sécurité.

Les codes secrets dans l'histoire

Au cours des siècles, de nombreuses techniques furent élaborées pour protéger les échanges d'informations. Dès l'Antiquité, des moyens de transmission d'informations « sûrs » furent développés. Au V$^{\text{ième}}$ siècle avant J.-C., Histaïaeus écrivit à Aristagoras en tatouant son message sur le crâne rasé d'un esclave. Il attendit la repousse des cheveux avant d'envoyer le messager demander de l'aide à Aristagoras pour se soulever contre le roi des Perses. Ce procédé s'apparente à la technique dite de *stéganographie*, du grec « *steganos* » signifiant couvert et « *graphein* » signifiant écrire. Cette technique est l'art de cacher un message, de sorte que l'existence même du secret en soit dissimulée. Détecter le message puis le comprendre devient alors difficile sans savoir où et comment chercher. De nombreuses techniques de stéganographie furent inventées comme l'encre invisible au temps de Pline (I$^{\text{er}}$ siècle avant J.-C.) ou encore récemment le « *watermarking* » (filigrane électronique) qui permet de dissimuler le copyright d'une image sans qu'il apparaisse sur l'image.
D'autres techniques pour sécuriser les communications furent développées, elles reposent pour la plupart sur une approche cryptographique (du grec « *kruptos* » signifiant cacher et de « *graphein* » signifiant écrire). Les techniques cryptographiques, contrairement à la stéganographie utilisée par Histaïaeus, modifient les messages originaux pour les rendre « incompréhensibles » afin d'assurer un certain niveau de sécurité face aux attaquants. Ainsi, le secret à protéger dans la stéganographie est l'existence

du message, alors que dans une approche cryptographique, le secret réside dans les clefs de déchiffrement du message chiffré qui est inintelligible sans ces clefs.

Une des premières techniques cryptographiques est le chiffrement par transposition, dans laquelle l'ordre des lettres du message original est permuté. Pour déchiffrer le message, il suffit d'appliquer la méthode inverse. Un exemple connu d'un tel chiffrement est la *scytale spartiate*, utilisée au V$^{\text{ième}}$ siècle avant J.-C. par les Grecs. Elle consiste en un bâton, autour duquel est enroulée une lanière de cuir. L'expéditeur écrit son message sur la lanière, puis une fois terminé, la déroule et l'envoie. Le récepteur enroule à son tour la lanière reçue sur un bâton de même diamètre, ce qui lui permet ainsi de retrouver le texte original. Dans cet exemple, le diamètre du bâton est secret et permet de protéger l'information.

Une autre technique, appelée chiffrement par substitution, consiste à changer l'alphabet pour chiffrer un message. Elle était déjà utilisée du temps des Romains sous le nom de *chiffrement de César*. Le chiffrement de César d'un message est réalisé en décalant de trois lettres dans l'alphabet chaque lettre du message à transmettre. Pour décoder un message chiffré, il suffit de décaler chacune des lettres de trois positions dans le sens inverse de l'alphabet. Dans cet exemple, ce qui devient secret et permet de protéger l'information est la liste des décalages à effectuer dans l'alphabet. Pour une langue donnée, une étude des fréquences d'apparition des lettres de l'alphabet dans un texte fournit une aide précieuse pour « casser » les chiffrements par substitution. Possédant un texte d'une longueur suffisante, il est alors possible de deviner les lettres les plus usitées, et ainsi de déchiffrer le message. Le chiffrement de Vigenère (XVI$^{\text{ième}}$ siècle) est un autre chiffrement par substitution, plus évolué : plusieurs chiffrements par substitution sont appliqués dans un certain ordre. Cet ordre correspond à un mot ou une phrase connu de l'expéditeur et du récepteur du message. Cette information partagée constitue une *clef* qui permet d'effectuer dans le bon ordre les différents chiffrements par substitution. Le chiffrement de Vigenère est lui aussi sensible à l'analyse de fréquence lorsque la clef est de taille fixée. Au contraire, si la clef est aussi longue que le message à chiffrer, il s'agit du chiffrement symétrique parfait aussi appelé *chiffrement à masque jetable* (« *One-time Pad* ») présenté un peu plus loin.

Pour terminer, un dernier exemple historique est présenté. Entre les deux guerres mondiales, les Allemands mirent au point la machine ENIGMA. Celle-ci permet de chiffrer un message grâce à un dispositif électromécanique qui, en fonction d'une clef donnée, réalise une combinaison de substitutions polyalphabétiques et de transpositions. Ainsi les Allemands pensaient communiquer des informations en toute sécurité à leurs troupes. Mais les Alliés, sous la direction d'Alan Turing, mirent au point « LA BOMBE », un des premiers ordinateurs. Ceci a permis de déchiffrer les messages générés par ENIGMA. Pour plus de précisions sur ENIGMA et les codes secrets dans l'Histoire, le lecteur peut consulter le livre de S. Singh [Sin99].

Les méthodes cryptographiques présentées utilisent un algorithme et une clef secrète, cette dernière ne devant être connue que des seuls participants à l'échange. La transmission de cette clef qui s'effectuait, il y a encore quelques années, par un échange physique entre personnes de confiance, constitue une étape primordiale dans la sécurité du protocole de communication. La confidentialité de l'échange reposant sur cette clef, sa connaissance par un tiers réduit à néant la protection apportée.

Objectifs de sécurité

L'objectif fondamental de la cryptographie est de permettre à deux personnes, appelées traditionnellement *Alice* et *Bob* de communiquer à travers un canal peu sûr de telle sorte qu'un opposant, *Oscar*, qui a accès aux informations qui circulent sur le canal de communication, ne puisse ni comprendre et/ou modifier ce qui est échangé, ni se faire passer pour Alice ou Bob. Le canal peut être par exemple une ligne téléphonique ou tout autre réseau de communication.

Les communications échangées entre Alice et Bob sont sujettes à un certain nombre de menaces. La cryptographie apporte des fonctionnalités permettant de répondre à ces menaces, résumées dans l'ensemble Confidentialité, Authentification, Intégrité, Non-répudiation (CAIN) :

— **Confidentialité** des informations stockées ou manipulées par le biais des algorithmes de chiffrement. La confidentialité consiste à garantir que seules ont accès aux informations les personnes autorisées à les connaître ou, en d'autres termes, à *empêcher l'accès* aux informations à ceux qui n'en sont pas les destinataires. Ils peuvent lire les messages chiffrés transmis sur le canal mais ne doivent pas pouvoir accéder à leurs contenus.

— **Authentification** des protagonistes d'une communication. L'authentification a pour but de valider l'identité d'une personne ou de détecter une usurpation d'identité, afin d'avoir la garantie que la personne est bien celle qu'elle prétend être. Le terme « authentification » est également utilisé pour désigner la vérification de l'origine de données reçues (aussi appelée « preuve d'origine »). Par exemple, Alice peut s'authentifier en prouvant à Bob qu'elle connaît un secret S qu'elle est la seule à connaître.

— **Intégrité** des informations stockées ou manipulées. L'intégrité a pour but de vérifier que le message n'a pas subi d'*altérations* lors de son parcours (*cf.* figure 3). Cette vérification concerne par exemple une potentielle modification ou substitution volontaire et malicieuse de l'information provoquée par un tiers lors du transfert sur un canal de communication. Ces modifications sont en général masquées par le tiers pour être difficilement détectables. Sur la figure 3, par exemple, le contrôle d'intégrité sur un message M se fait grâce à une fonction f telle qu'il doit être très difficile de trouver deux messages M_1 et M_2 ayant la même image A par f.

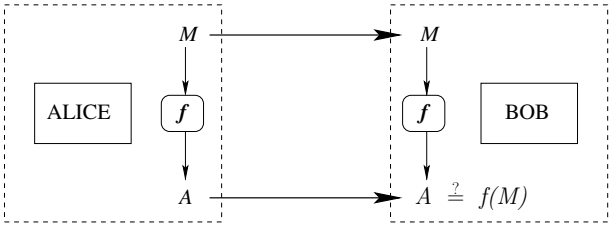


FIGURE 3 – Principe d'un algorithme de contrôle d'intégrité.

— **Non-répudiation** des informations. C'est une protection entre les protagonistes d'un échange, et non plus contre un tiers. Si Alice envoie un message M, elle ne doit pas pouvoir prétendre ensuite devant Bob qu'elle ne l'a pas fait, ou alors qu'elle a envoyé M' et que le message a été mal compris et réciproquement. Techniquement, il s'agit souvent d'une combinaison d'authentification et d'intégrité prouvable à un tiers, par exemple un magistrat. C'est pour cela que des algorithmes asymétriques sont aujourd'hui indispensables.

Ces quatre services sont les principales propriétés de sécurité nécessaires dans les communications sécurisées mais elles ne sont pas les seules ; il y a par exemple :

— **le contrôle d'accès** qui est la faculté de limiter et de contrôler l'utilisation de systèmes ou d'applications. Il est en général nécessaire de s'authentifier ou d'être authentifié au préalable, et les droits d'accès sont alors adaptés en conséquence ;

— **la disponibilité** des ressources. Une attaque classique des systèmes est le déni de service qui implique une perte ou une réduction de l'accès à ces ressources. Cela nécessite donc des contre-mesures, soit automatiques, soit par action humaine, afin de prévenir la perte de disponibilité ou de rétablir l'accessibilité ;

— **la fraîcheur** des messages. Cette propriété assure que les messages viennent d'être fraîchement générés et ainsi d'éviter les attaques dites « *par rejeu* ». En effet, une attaque aisée sur des systèmes d'information consiste à rejouer tout ou partie d'une communication préalablement enregistrée. Se prémunir contre le rejeu de message est un mécanisme qui peut s'effectuer simplement par l'ajout de compteur ou encore de nonces (« *Number used ONCE* »). Il n'est pas rare que ces mécanismes permettent par la même occasion d'authentifier les participants (par exemple dans TLS ou IPSec présentés dans le chapitre 12).

Jusqu'à une période récente, le chiffrement ne tenait compte que de la confidentialité, et seules les méthodes à clefs secrètes étaient développées. Les quarante dernières années ont vu émerger l'étude de nouvelles tendances :

— l'authentification devient aussi, voire plus, importante que le secret. C'est particulièrement vrai dans le commerce électronique : il faut pouvoir prouver que la commande vient bien de la personne à qui la livraison est destinée pour éviter les contestations ;

— une partie de la clef doit être publique, afin de ne pas provoquer une explosion du nombre de clefs nécessaires pour communiquer avec un grand nombre de personnes. Les termes de paire de clefs publique/privée ou encore de bi-clef sont souvent utilisés.

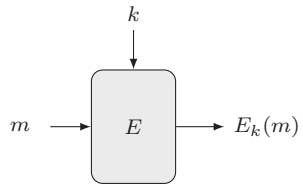
Un dernier critère primordial est l'efficacité des calculs de chiffrement et déchiffrement, ainsi que la taille des messages chiffrés. Les opérations portant sur de grandes quantités de données, le critère d'efficacité est très important afin de pouvoir chiffrer « à la volée » des flux audio ou vidéo par exemple en utilisant au minimum la bande passante.

Un système de chiffrement idéal devrait résoudre tous ces problèmes simultanément : utiliser des clefs publiques, assurer le secret, l'authentification et l'intégrité, le tout le plus rapidement possible, tout en garantissant la non-répudiation. Malheureusement, il n'existe pas encore de technique unique qui satisfasse tous ces critères. Les systèmes conventionnels comme « *Advanced Encryption Standard* » (AES) sont efficaces mais

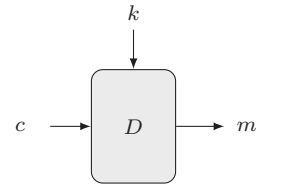
utilisent des clefs secrètes ; les systèmes à clef publique peuvent assurer l'authentification mais sont inefficaces pour le chiffrement de grandes quantités de données car trop coûteux. Cette complémentarité a motivé le développement de protocoles cryptographiques hybrides, à l'instar de *PGP* (*cf.* chapitre 7), qui utilisent à la fois des paires de clefs publique/privée et des clefs secrètes.

Un peu de cryptographie

La cryptographie est un ensemble de techniques qui protègent un message en le transformant en un autre message : cette transformation modifie l'information contenue dans le message original pour rendre l'information transmise non compréhensible. Parallèlement à la mise en œuvre de méthodes cryptographiques, des méthodes de cryptanalyse ont vu le jour pour déchiffrer les messages. Ainsi, les cryptographes inventent des méthodes de chiffrement de plus en plus complexes, composées d'une fonction de chiffrement et d'une fonction de déchiffrement. La fonction de *chiffrement* permet de chiffrer un message donné m à l'aide d'une *clef* k, paramètre de la fonction de chiffrement. La fonction est notée E_k. Le message m chiffré par la clef k est noté $E_k(m)$.



La fonction de *déchiffrement*, notée $D_k(c)$, permet de retrouver le message original m à partir d'un message chiffré $c = E_k(m)$ connaissant la clef de déchiffrement k.



Ces fonctions vérifient l'équation $D_k(E_k(m)) = m$, ce qui permet de retrouver le message original avec la fonction de déchiffrement et le message chiffré. En général, ces fonctions reposent sur un problème « difficile » à résoudre. Ainsi, sans connaître la clef de déchiffrement, il est difficile de déchiffrer un message, et ce, tant qu'il n'existera pas de moyen de résoudre le problème dit « difficile ». Il existe deux catégories de chiffrement : les chiffrements *symétriques* et les chiffrements *asymétriques*, également appelés chiffrements à clef publique. Ces derniers chiffrements utilisent une paire de clefs comportant une clef publique et une clef privée (secrète). La figure 4 représente la notation utilisée dans cet ouvrage pour des clefs publiques, privées ou symétriques. Pour plus de détails, le livre référence de B. Schneier [Sch01a] et de nombreux autres ouvrages [Kob00, Buc01, DK02, DRTV18] présentent les différentes méthodes de chiffrement existantes. Parmi les chiffrements à clef publique il existe des chiffrements

FIGURE 4 – Clef publique, clef privée asymétriques et clef symétrique.

déterministes ou des *chiffrements probabilistes* : un chiffrement déterministe d'un message donne toujours le même chiffré, alors qu'un chiffrement probabiliste donne un chiffré différent à chaque chiffrement du même message.

Chiffrements symétriques

Les chiffrements symétriques utilisent la même clef pour chiffrer et déchiffrer un message. La protection de cette clef est cruciale pour la confidentialité des informations échangées. Les algorithmes de chiffrement symétrique reposent souvent sur des techniques de substitutions et de transpositions. Cela offre un moyen rapide et efficace pour chiffrer un message.

Le chiffrement « parfait » (chiffrement de Vernam)

Le chiffrement symétrique parfait (incassable au sens de la théorie de l'information de Claude Shannon) est le *chiffrement à masque jetable* (One-Time Pad) aussi appelé chiffrement de Vernam, car supposé avoir été découvert par le major J. Mauborgne et G. Vernam en 1917. Or d'après de récents travaux [Bel11] il fut inventé 35 ans plutôt par Frank Miller. Un masque jetable est une suite de bits aléatoires aussi longue que le message à chiffrer. Cette suite est un secret connu uniquement des deux participants et ne peut être utilisée qu'une seule fois. Le message original est codé sous forme de bits. Pour le chiffrer, chaque bit du masque est comparé au message. S'ils sont égaux, 0 est placé dans le message chiffré sinon 1 ; ceci revient à effectuer une addition bit à bit modulo 2. Avec le masque, il est alors facile de reconstituer le message original.
Malheureusement, ce chiffrement présente quelques inconvénients lors de sa mise en pratique car le masque doit être :

- aussi long que le message à chiffrer ;
- utilisé une seule fois ;
- généré de manière aléatoire pour éviter qu'il ne soit deviné ;
- échangé de manière sûre entre les participants.

Sans connaître le masque, il est prouvé sous ces conditions qu'il est impossible de retrouver le message original. Cependant, bien qu'inviolable en théorie, ces inconvénients le rendent finalement très complexe à utiliser en pratique.
Comme l'a souligné Steve Bellovin :

> « As a practical person, I've observed that one-time pads are theoretically unbreakable, but practically very weak. By contrast, conventional ciphers are theoretically breakable, but practically strong. »*