Université Ziane Achour de Djelfa

Département : Mathématiques et Informatique

Cryptographie

Introduction et Historique

Historique et introduction

Lorsque Jules César envoyait des messages à ses généraux, il ne faisait pas confiance à ses messagers. Il remplaçait donc tous les A contenus dans ses messages par des D, les B par des E, et ainsi de suite pour tout l'alphabet. Seule la personne connaissant la règle du « décalage par trois » pouvait déchiffrer ses messages.

Historique et introduction

Et voilà comment tout a commencé…

Historique et introduction

De nos jours on retrouve de la cryptographie dans :

- Armée.
- Système bancaire.
- Internet (achat, identification).
- Téléphone portable.
- TV payante.
- Carte d'identité électronique.
- Vote électronique.

Historique et introduction

Pour protéger une information :

Stéganographie

Cryptographie

- Transposition
- Substitution

Historique et introduction

La stéganographie : écriture couverte

L'information est dissimulée au sein d'une autre information afin de la rendre invisible.

Durant l'antiquité, certains généraux rasaient le crâne de leurs esclaves, leur tatouaient un message et attendaient que les cheveux repoussent pour faire passer des informations importantes.

Historique et introduction

La cryptographie :

L'information est modifiée selon une méthode préétablie afin de la rendre incompréhensible.

Il existe deux grandes catégories :

- **Par transposition :** l'ordre des éléments d'une information est modifiée (caractères d'une phrase, pixels d'une image, ...)

- **Par substitution** : les éléments d'une information sont remplacés par d'autres (remplacer tous les A par B, B par C, etc...)

Cryptographie

Définitions

Protagonistes traditionnels

- **Alice** et **Bob** souhaitent se transmettre des Informations
- **Oscar**, un opposant qui souhaite espionner Alice et Bob.

Objectif fondamental de la cryptographie :

- Permettre à Alice et Bob de communiquer sur un canal peu sûr !! (Réseau informatique/ téléphonique)
- Oscar ne doit pas comprendre ce qui est échangé.

Définitions

Message clair: Cette expression désigne le message original n'ayant subi aucune modification

Clé: La clé désigne l'information permettant de chiffrer et de déchiffrer un message

Chiffrement:
Processus de transformation d'un message M de telle manière à le rendre incompréhensible :

- Basé sur une fonction de chiffrement E
- On génère ainsi un message chiffré C = E(M)

Définitions

Déchiffrement:

Processus de reconstruction du message clair à partir du message chiffré :

Basé sur une fonction de déchiffrement D
On a donc D(C) = D(E(M)) = M

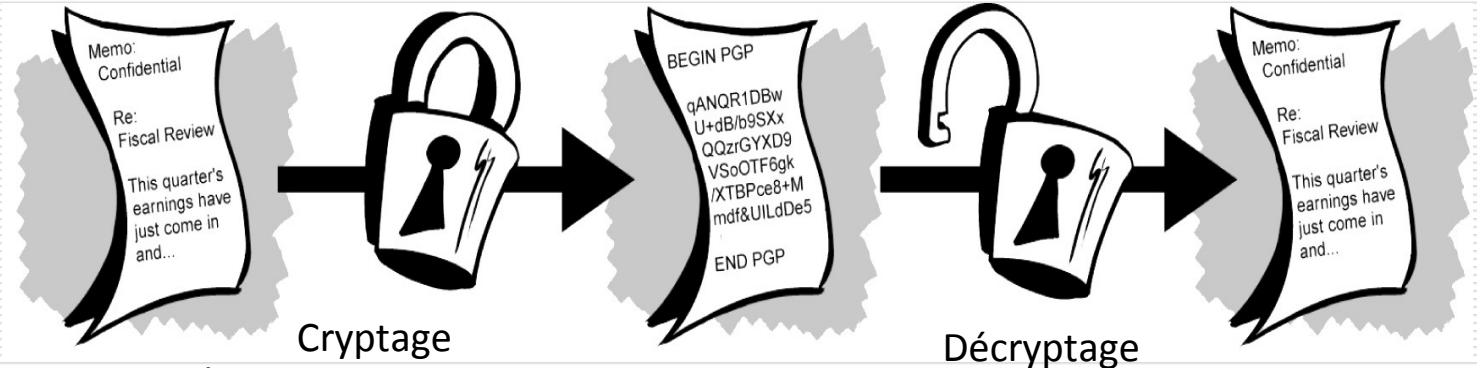
En pratique : E et D sont généralement paramétrées par des clefs Ke et Kd :
$E_{ke}(M) = C$
$D_{kd}(C)=M$

Définitions
Cryptage et décryptage

- La **méthode** permettant de dissimuler du texte en clair en masquant son contenu est appelée le **cryptage**.

- **Le cryptage (verbe Chiffrer ou chiffrer)** consiste à transformer un texte normal en charabia (jargon) inintelligible appelé **texte chiffré**

Définitions
Cryptage et décryptage



Le **décryptement** est l'action consistant à retrouver, le message

non codé sans connaître la clé de déchiffrement.

Définitions
Cryptographie et cryptanalyse

- **La cryptographie** est la science qui utilise les mathématiques pour le cryptage et le décryptage de données.

- **La cryptanalyse** est l'étude des informations cryptées, afin d'en découvrir le secret.

- **La cryptologie** englobe la cryptographie et la cryptanalyse

Définitions
Cryptographie

Exemple: Chiffrement de César

Chiffrement de César

Consiste à décaler l'alphabet clair. Le décalage est la clé du chiffrement

Exemple :
On veut chiffrer le mot *CRYPTOGRAPHIE avec un* décalage de 3. Pour cela on écrit les alphabets clair et chiffré comme suit :

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
DEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZABC
Et on remplace:
CRYPTOGRAPHIE ---> FUBSWRJUDSKLH

Chiffrement de César

Faiblesse du chiffre de César:

- Il n'y a que 26 clés possibles !
- Donc étant donnée un message chiffré, il suffit de tester les 26 clés possibles pour retrouver le message clair.
- Cela se fait en quelques minutes !!

Solution au problème de clés :

Utiliser un alphabet chiffré aléatoirement

Chiffrement de César

Exemple :
ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
OHGFEDCBUKJPNMIQRXSTLZXYWV

Dans ce cas, le nombre de clés possibles passe à 400 000 000 000 000 000 000 000 000 !!!

Cryptanalyse:
Il est évident impossible de tester toutes les clés possibles, même une machine est incapable de le faire en un temps raisonnable (300 000 ans pour un ordinateur très puissant !!).

Chiffrement de César

Pourtant il est possible là encore de casser ce chiffrement en quelques minutes !!

Dans la langue française, par exemple, on sait que la fréquence d'apparition de chaque lettre est à peu près stable. Il suffit donc à:

- Mesurer la fréquence d'apparition de chaque lettre d'un texte chiffré
- Comparer avec la table des fréquences des lettres françaises
- Déduire l'alphabet chiffré

Définitions
Cryptographie

Cryptographie moderne

Cryptographie symétrique

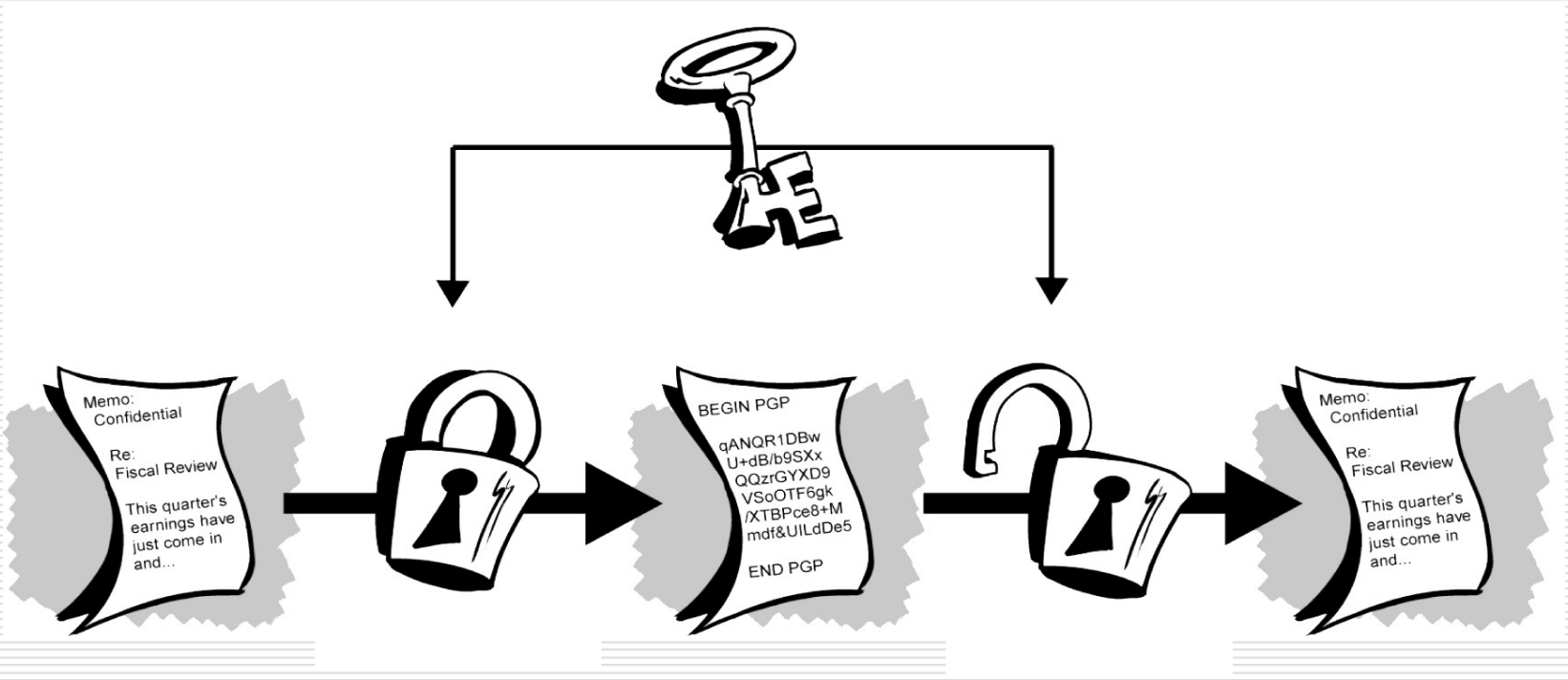
- Ou cryptographie a clé privée

- On utilise la même clé pour chiffrer et déchiffrer un message (ke = kd = k).

- Les deux communiquants doivent être en possession de cette clé.

- La norme de cryptage de données (**DES**) est un exemple de ce type de système largement utilisé par le gouvernement fédéral des Etats-Unis.

Cryptographie symétrique



Texte en clair

Texte chiffré

Texte en clair

Cryptographie symétrique
Avantages et inconvenants

Avantage:

- Il est très rapide

Inconvénient:

- La distribution des clés reste le problème majeur du cryptage conventionnel surtout lorsque Le nombre de communicants devient grand.

Autrement dit, comment faire parvenir la clé à son destinataire sans qu'aucune personne ne l'intercepte ?

Cryptographie symétrique
Comment partager un secret ?

Au début des années 70, la solution fut trouvée (des recherches depuis les années 50).

Exemple du facteur :

On suppose que Alice veut envoyer un colis secret à Bob par la poste, mais que leur facteur ne peut s'empêcher de lire les correspondances non closes. Comment peut elle lui envoyer ?

Cryptographie symétrique
Comment partager un secret ?

- Alice met son colis dans une boite qu'elle ferme avec un cadenas et l'envoie à Bob.
- Bob reçoit le colis, rajoute un cadenas à la boite et renvoie le tout à Alice
- Alice retire son cadenas avec sa clé et renvoie la boite à Bob.
- Bob peut maintenant ouvrir la boite avec sa clé et profiter du colis.

Remarque

A aucun moment le facteur n'a été en mesure d'ouvrir la boite

Cryptographie symétrique
Comment partager un secret ?

- Encore et toujours des problèmes !!

En particulier l'ordre dans lequel sont effectués les chiffrements et les déchiffrements successifs joue un rôle crucial

De plus les échanges ne peuvent se faire qu'en présence de deux parties.

De là va apparaître la cryptographie asymetrique (à clé publique).

Cryptographie asymétrique

- Chaque entité possède une paire de clés :
Une clé publique, connue par toutes les autres entités et utilisée pour chiffrer un message donné,

Une clé privée qui ne doit être connue que par l'entité qui possède la paire en question, et qui est utilisée pour déchiffrer un message

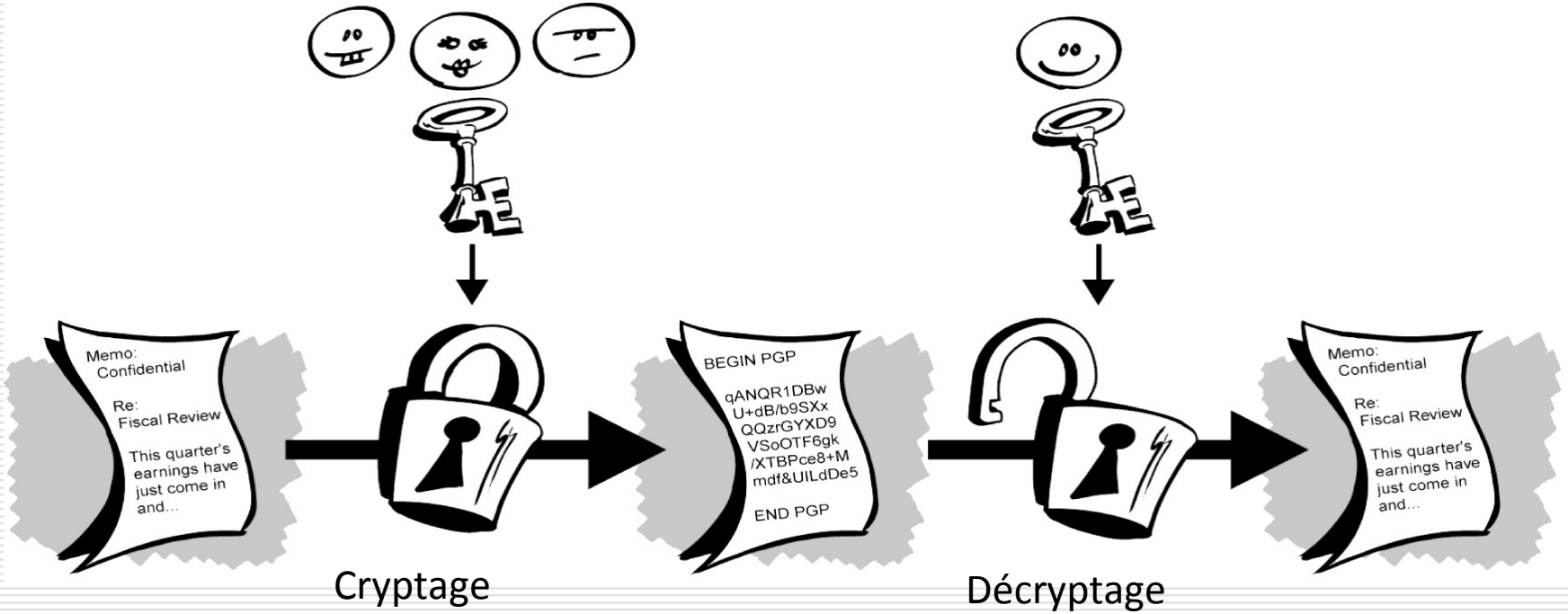
- Un message chiffré avec une clé publique ne peut être déchiffré qu'avec la clé privée correspondante.

Cryptographie asymétrique

Principe:

- Bob laisse ses cadenas en libre accès à la poste
- Alice peut à tout moment venir à la poste prendre un cadenas et envoyer un message à Bob
- Bob peut facilement ouvrir son cadenas avec sa clé et récupérer le message.

Cryptographie asymétrique



Cryptographie asymétrique

Difficulté : Il faut disposer d'un système de cryptage ayant des clés de chiffrement et des clés de déchiffrement différentes.

But:

Trouver des fonctions mathématiques:

- Faciles à utiliser dans un sens
- Très difficile à inverser, à moins de connaître un paramètre secret

- Le chiffrement asymétrique est utilisé, par exemple, dans la distribution des clés qui seront utilisées, par la suite, pour le chiffrage symétrique.

Cryptographie asymétrique
RSA: le premier protocole a clef publique

- Alice choisit deux grands nombres premiers p et q et calcule : n = pxq et z=(p-1)(q-1).

- Elle choisit un entier e qui n'a pas de facteur commun avec z (premiers entre eux).

- Elle calcule d tel que (ed-1) est exactement divisible par z.

- **Elle déduit :**

Clé publique = (n,e) et clé privée =(n,d)

Cryptographie asymétrique
RSA: le premier protocole a clef publique

- Grâce à sa clé public, Bob peut chiffrer son message avec la formule RSA. Mais il ne peut plus le déchiffrer, car RSA est impossible à inverser, à moins de connaître p et q.

- Alice reçoit le message chiffré de Bob et peut le déchiffrer grâce à p et q.

Bob veut envoyer un message m à Alice :
chiffrement : $\mathbf{c = m^e \bmod n}$
Alice reçoit le message c et calcule :
déchiffrement : $\mathbf{m = c^d \bmod n = (m^e \bmod n)^d \bmod n}$

Cryptographie asymétrique
RSA: le premier protocole a clef publique

- **Exemple**:

p=5, q=7, m=12

e?
d?
c?

Cryptographie asymétrique
Chalenge RSA

Factoriser le nombre:
114 381 625 757 888 867 669 235 779 976 146 612
010 218 296 721 242 362 562 561 842 935 706 935
245 733 897 830 597 123 563 958 705 058 989 075
147 599 290 026 879 543 541

et utiliser cette factorisation pour déchiffrer un Message codé avec RSA.

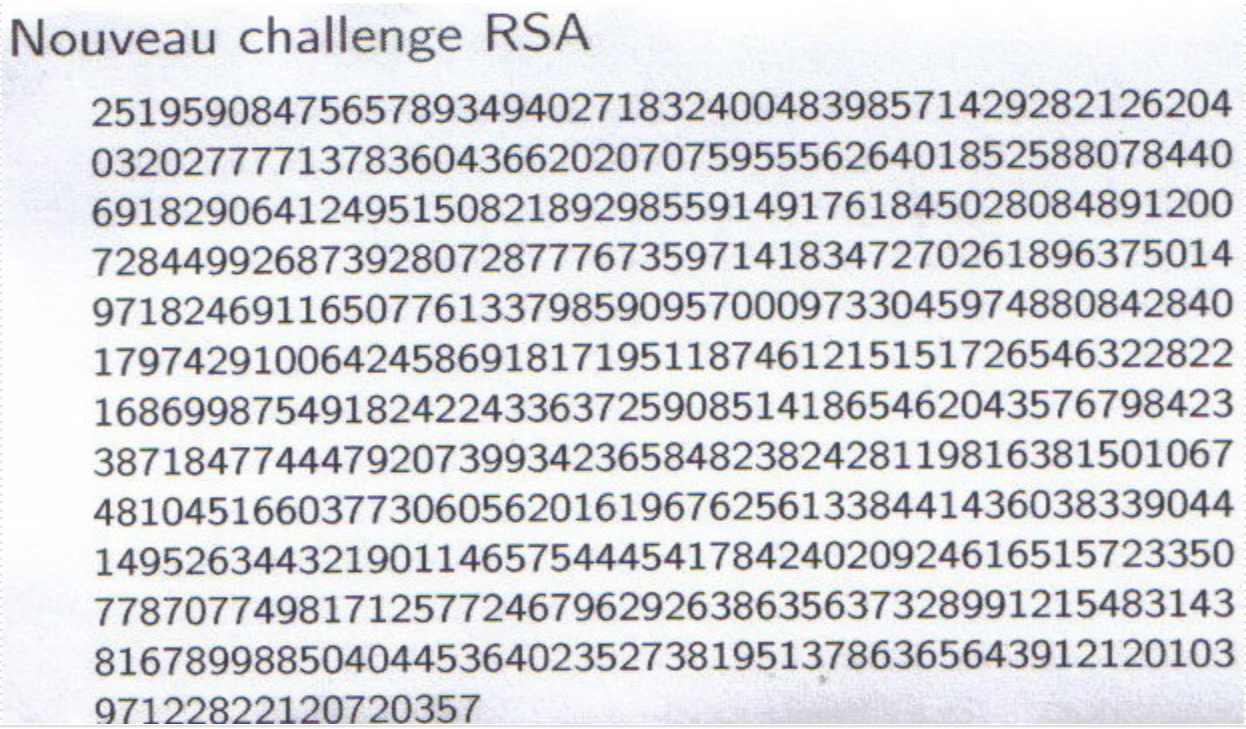
100$ était offert au premier qui parviendrait à déchiffrer le message.

Cryptographie asymétrique
Chalenge RSA

- Le but de ce concours était de tester la robustesse de RSA.

- Il aura fallu 17 ans pour qu'une équipe de 600 personnes remporte le concours !!!

Cryptographie asymétrique
Un nouveau chalenge est lancé



Récompense 200 000$!!!

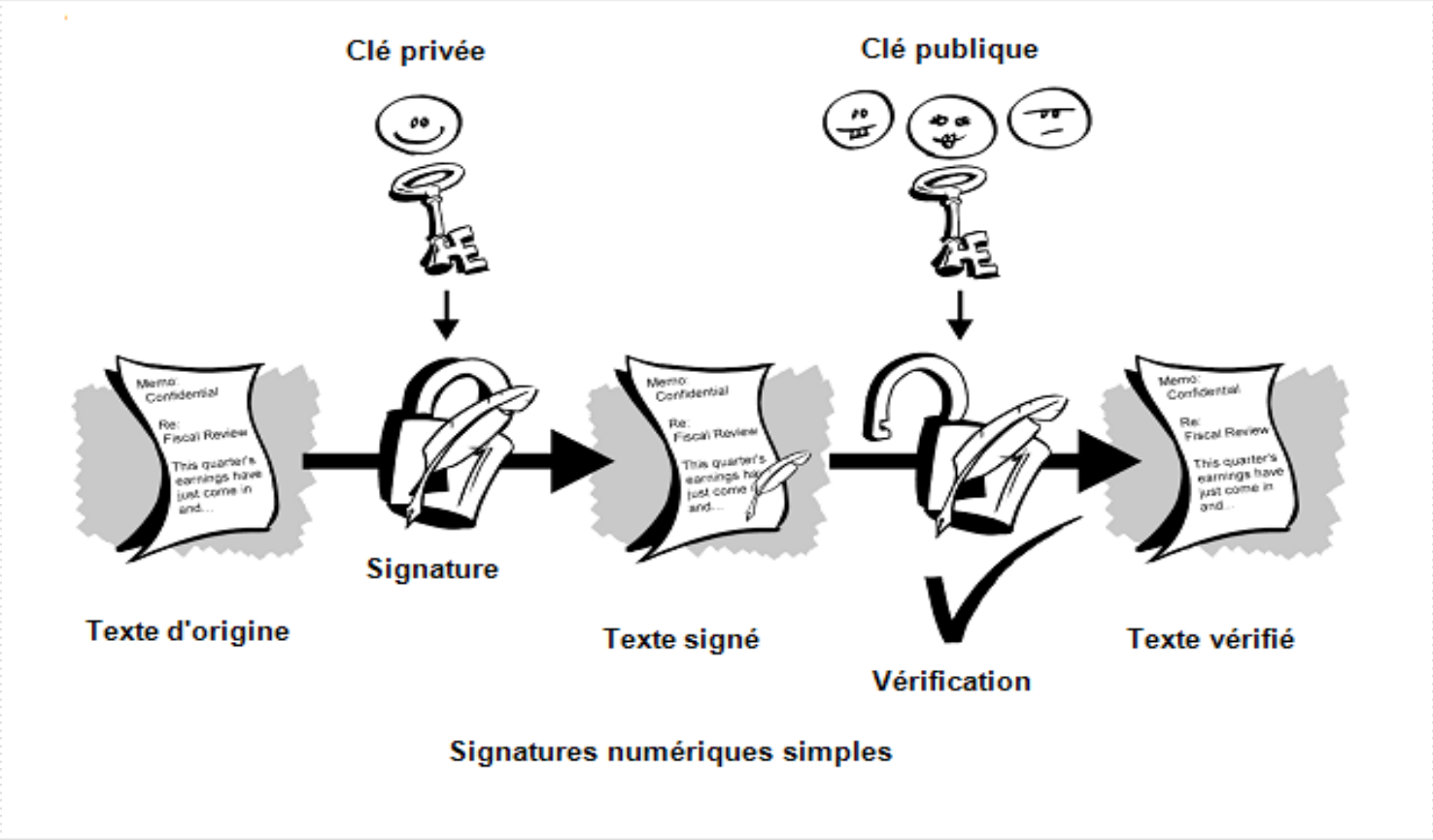
Signature numérique

- L'un des principaux avantages de la cryptographie de clé publique est qu'elle offre une méthode d'utilisation des signatures numériques.

- C’est une chaîne de données qui associe un message (dans sa forme numérique) à l'entité dont il est originaire.

- Les signatures numeriques sont largement utilisées dans la sécurité informatique, dans **l'authentification** ou **l'intégrité des données**, et la **non répudiation**

Signature numérique



Signature numérique
Fonction de hachage

- Le système décrit précédemment est lent et produit un volume important de données.

- L'ajout d'une fonction de hachage à sens unique permet d'améliorer le schéma précédent.

- Cette fonction traite une entrée de longueur variable afin d'obtenir en sortie un élément de longueur fixe, à savoir 160 bits.

- En cas de modification des données, la fonction de hachage donne une valeur de sortie différente.

Signature numérique
Fonction de hachage

Texte
en clair

Hash
SHA-1

HASH

Signature numérique
Exemples de fonctions de Hashage

- **MD5** : Message Digest 5, il génère une empreinte de 128 bits.

- **SHA-1** : Sécure Hash Algorithm, il génère une empreinte de 160 bits..

Problème avec la Cryptographie asymétrique

- Une personne peut placer une fausse clé (celle du pirate par exemple) comportant le nom et l'ID utilisateur du destinataire.

- Les données cryptées (et interceptées) vers le détenteur réel de cette clé erronée sont dorénavant entre de mauvaises mains.

- Donc les utilisateurs doivent constamment vérifier qu'ils cryptent vers la clé du bon utilisateur.

- **Solution**: l'utilisation des Certificats numériques

Certificats numériques

- Les certificats numériques simplifient la tâche qui consiste à déterminer si une clé publique appartient réellement à son détenteur supposé.

- Un certificat correspond à une référence. Il peut s'agir par exemple de votre **permis de conduire,** de votre **carte de sécurité sociale** ou de votre **certificat de naissance**.

- Chacun de ces éléments contient des informations vous identifiant et **déclarant qu'une autre personne a confirmé votre identité**.

Certificats numériques

Un certificat numérique contient des données similaires à celles d'un certificat physique.

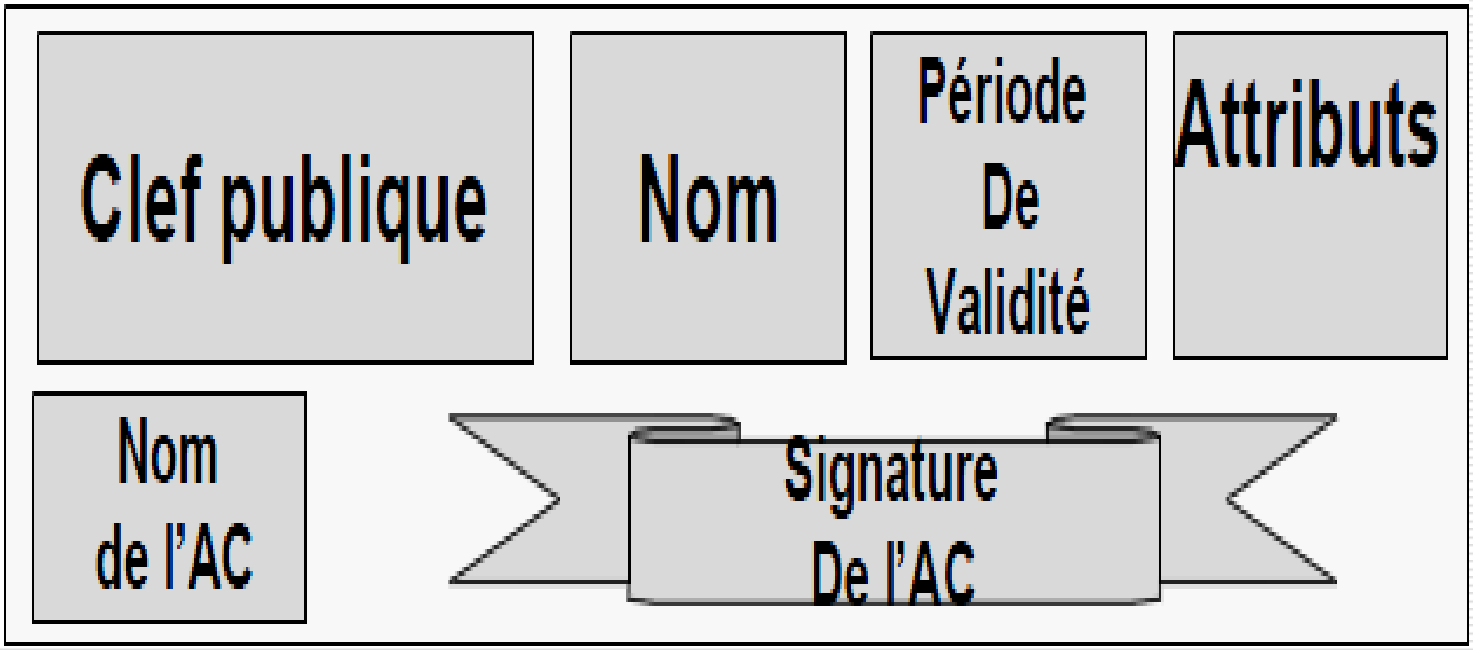
Un certificat numérique se compose de:

- Une clé publique.
- Des informations sur le certificat. (Informations sur l'« identité » de l'utilisateur:nom, ID utilisateur, etc.)
- Une ou plusieurs signatures numériques.

- La signature numérique d'un certificat permet de déclarer que ses informations ont été attestées par une autre personne ou entité.

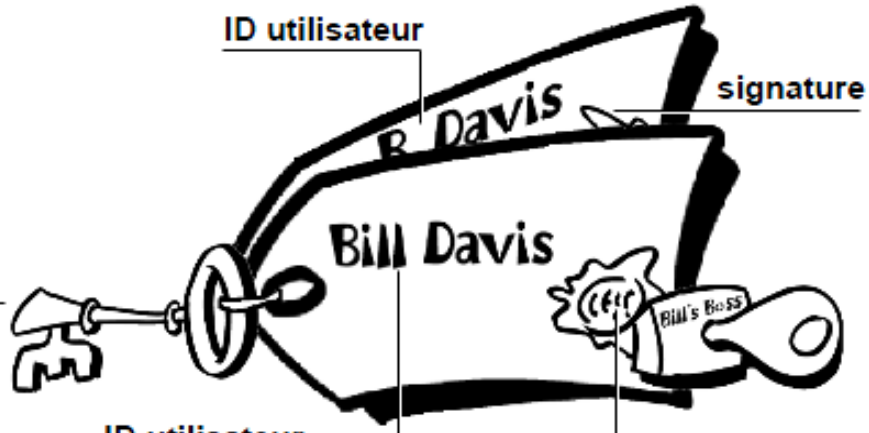
Certificats numériques

Les certificats sont émis par une autorité de certification (Certificate Authority – CA)



Certificats numériques
Exemple certificat PGP

clé publique
- numéro de version de PGP
- heure de création de la clé
- durée de validité de la clé
- type de clé (DH, RSA)
- clé elle-même



ID utilisateur
- chaîne de caractères identifiant le détenteur de la clé

signature
- certification de l'association de l'ID utilisateur à la clé
- numéro de version
- algorithme de résumé de message
- calcul de résumé de message
- résumé de message signé
- ID de la clé du signataire

Certificats numériques
Principe

- Alice fait une requête de certification d'une clé publique auprès d'une autorité de certification.

- Cette dernière vérifie la véracité des infos contenues dans ce certificat (authentifications des infos) puis le certificat est émis dans un annuaire

- Bob récupère la clé publique d'Alice via l'annuaire, récupère aussi un certificat auti-signé via l'autorité de certification et vérifie son intégrité grâce à la signature de la CA.

PKI (Public Key Infrastructure)
Infrastructure à clefs publiques

Nature : Infrastructure (ensemble d'éléments, protocoles et services)

Rôle : Gestion des clés publiques à grandes échelle
- Enregistrement et émission
- Stockage et distribution
- révocation et vérification de statut
- Utilisation de certificats

PKI (Public Key Infrastructure)
Infrastructure à clefs publiques

C'est toute l'infrastructure nécessaire au fonctionnement d'une ou plusieurs ACs pour délivrer des certificats :

- **Matériel** : ordinateurs, locaux…
- **Informatique** : logiciels
- **Humain** : les employés
- **Organisationnel** : procédures de révocation…
- **Administratif** : désignation d'un responsable
- **Financier** : assurance des risques en cas de dommage par utilisation de certificat

Les applications et les Communications sécurisées

Les Communications sécurisées

Le protocole SSH (Secure Shell**)**

Les protocoles d'accès distant à une machine tels que Telnet, rlogin, etc.. Sont limités:

- Circulation des mots de passe en clair
- Authentification faible basée sur le numéro IP (Cas du protocole rlogin)
- Commandes à distance non sécurisées.
- Transferts de fichiers non sécurisés.

Solution: l'utilisation du protocole SSH

SSH utilise la cryptographie asymétrique (RSA) et symétrique

Le protocole SSH
Principe

- Un serveur SSH dispose d'un couple de clefs stocké dans le répertoire /etc/ssh et généré lors du lancement du serveur

- Lorsqu'un client SSH se connecte au serveur, ce dernier envoie sa clé publique au client.

- Le client génère une clé secrète (chiffrement symétrique), et l'envoie au serveur, en cryptant l'échange avec la clé publique du serveur.

- Le serveur déchiffre la clé secrète avec sa clé privée.

Le protocole SSH
Principe

.➢Pour prouver au client qu'il est bien le bon serveur (authentification du serveur), il crypte un message standard avec la clé secrète et l'envoie au client.

➢Si le client retrouve le message standard en utilisant la clé secrète, il a la preuve que le serveur est le vrai.

➢Une fois la clé secrète échangée, le client et le serveur peuvent alors établir un canal sécurisé (grâce à la clé secrète partagée).

Faille du protocole SSH

.

- Attaque à base de la méthode Man In The Middle
- L'attaquant se place entre le client et le serveur afin d'intercepter les clés de l'encryptage.

SSL/TLS

SSL(Secure Socket Layer):

- Se situe entre la couche application et la couche transport.
- Garantit l'authentification, l'intégrité et la confidentialité.
- Développer par netscape et largement utilisé pour la sécurisation des sites www (https).
- La dernière version est SSL 3.0

SSL/TLS

TLS (Transport Layer Security)

- TLS 1.0 remplace SSL (very few differences).
- TLS 1.1 est la dernière version
- Tous les serveurs Web et les navigateur supportent la version TLS 1.1

Réseau VPN
(réseau privé virtuel)

. permet d'établir des communications sécurisées en s'appuyant sur un réseau existant non sécurisé.

VPN utilise le protocole IPSEC qui est composé de quatre protocoles :

- **Le protocole AH** (Authentification Host)
ce protocole permet de garantir l'authenticité des paquets échangés en leur inscrivant une somme de contrôle (entête du paquet + données du paquet) chiffrée.

Réseau VPN
(réseau privé virtuel)

- **Le protocole ESP** (Encapsuling Security Payload) :
Ce protocole permet de chiffrer toutes les données du paquet garantissant leur confidentialité

- **Le protocole IPComp :**
Ce protocole permet de compresser un paquet avant de le chiffrer avec ESP

- **Le protocole IKE** (Internet Key Exchange) :
Ce protocole est utilisé pour l'échange des clés pour les différents chiffrements.

Réseau VPN
(réseau privé virtuel)

VPN utilise aussi les protocoles:

- **PPTP** (point to point tunnelling protocol)
- **L2TP** (Layer 2 tunnelling protocol)

Les applications sécurisées

L'outil PGP

- Est un logiciel de cryptographie qui est bien adapté à l'utilisation sur Internet.

- PGP est une combinaison des fonctionnalités de la cryptographie de clé publique et de la cryptographie de clé secrète : **C'est un système hybride**

- PGP utilise en plus la compression des données afin de renforcer la sécurité des informations, de réduire le temps de transmission et d'économiser l'espace disque.

L'outil PGP
Chiffrement et déchiffrement

PGP crée une clé de session à usage unique. Cette clé correspond à un nombre aléatoire, généré par les déplacements aléatoires de la souris et les séquences de frappes de touche.

Pour crypter un texte clair, la clé de session utilise un Algorithme de chiffrement symétrique conventionnel (DES, AES,...).

Une fois les données codées, la clé de session est chiffrée à l'aide de la clé publique du destinataire (à l'aide d'une méthode de chiffrement asymétrique).

L'outil PGP
Chiffrement et déchiffrement

La clé de session chiffrée ainsi que le texte chiffré est transmis au destinataire.

Le processus de décryptage est inverse : le destinataire utilise sa clé privée pour récupérer la clé de session temporaire qui permettra ensuite de déchiffrer le texte chiffré.

Le protocole Kerberos

Kerberos est un protocole d'authentification réseau .
Kerberos utilise un système de tickets au lieu de mots de passe en texte clair. Ce principe renforce la sécurité du système et empêche que des personnes non autorisées interceptent les mots de passe des utilisateurs.

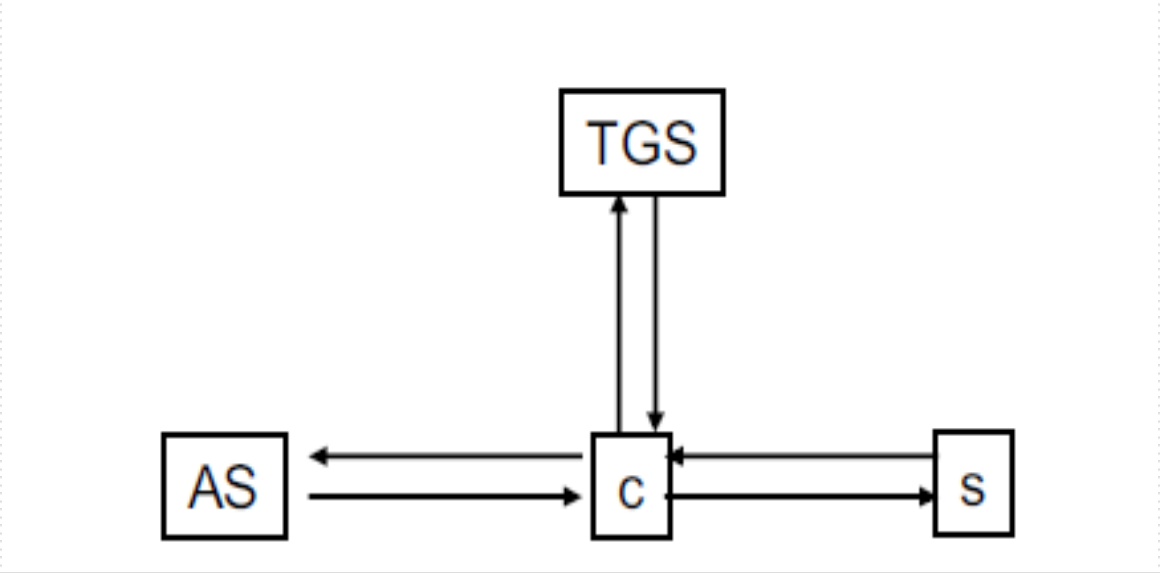
L'ensemble repose sur un chiffrement symétrique (clefs privées).

Le protocole Kerberos éléments

Dans un réseau simple utilisant Kerberos, on distingue:

- Le client (C), il a sa propre clé privée *KC*
- Le centre de distribution de clés (KDC pour *key distribution center), il connaît les clés privées KC et KTGS (appelé aussi AS: Authentication Server)*
- Le serveur de tickets (TGS pour ticket granting server), il a une clé privée *KTGS et connaît la clé privée KS du* serveur
- Le serveur (S), il dispose aussi d'une clé privée *KS*

Le protocole Kerberos éléments



Enfin!!!

Conclusions

- Aucune sécurité n'est parfaite. On définit juste un seuil.
- Des outils sont nécessaires, mais le travail quotidien est indispensable.
- Le niveau de sécurité d'un site est celui de son maillon le plus faible.

Conclusions

Le seul système informatique qui est vraiment sûr est un système éteint et débranché, enfermé dans un blockhaus sous terre, entouré par des gaz mortels et des gardiens hautement payés et armés.

Même dans ces conditions, je ne parierais pas ma vie dessus.

(c) Gene Spafford, fondateur et directeur du "Computer Operations, Audit and Security Technology Laboratory.