

# Introduction à la Cryptographie

## 1. Généralités et concepts de base

Cécile Pierrot, Chargée de Recherche INRIA Nancy  
cecile.pierrot@inria.fr

Supports de E. Thomé



Telecom Nancy, 2A ISS – 2021

# Objectifs du cours

---

- Comprendre
  - le rôle de la cryptographie dans la **protection de l'information**
  - les **fonctionnalités** cryptographiques fondamentales
  - les **limites** de la protection assurée par la cryptographie
- Connaître
  - le langage dans lequel est construite la cryptographie
  - quelques **primitives** cryptographiques et leurs principes

# Plan du cours (12 heures)

---

## 1. Généralités et concepts de base

## 2/3. Chiffrement symétrique

- chiffrement de Vernam
- chiffrement par flot
- chiffrement par bloc (AES)

## 4. Fonctions de hachage cryptographiques

- construction Merkle-Damgård
- attaques (tables arc-en-ciel)

## 5/6. Cryptographie à clé publique

- chiffrement (RSA)
- échange de clés (Diffie-Hellman)
- signature (DSA)

● 6 TD, 1 examen, 1 projet

# Bibliographie : histoire / vulgarisation

---



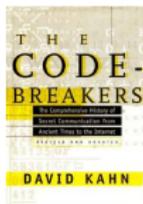
Singh, *Histoire des Codes Secrets*.

Livre de Poche, 2001.



Stern, *La Science du Secret*.

Odile Jacob, 1998.

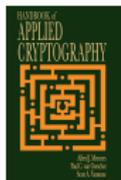


Kahn, *The Codebreakers, revised edition*.

Schribner, 1996.

# Bibliographie : ouvrages de référence

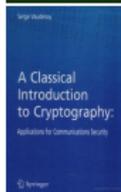
---



Menezes, van Oorschot, Vanstone,  
*Handbook of Applied Cryptography.*

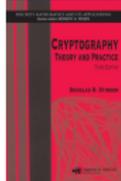
Chapman & Hall / CRC, 1996.

<http://www.cacr.math.uwaterloo.ca/hac/>



Vaudenay, *A Classical Introduction to Cryptography.*

Springer, 2005.



Stinson, *Cryptography: Theory and Practice, 3rd edition.*

Chapman & Hall / CRC, 2005.

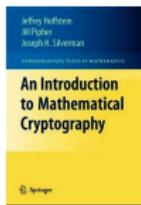


Vergnaud, *Exercices et problèmes de cryptographie.*

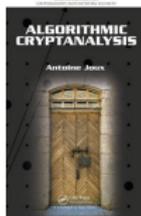
Dunod, 2017.

# Bibliographie : pour aller plus loin

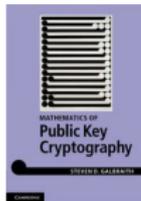
---



Hoffstein, Pipher, Silverman,  
*An Introduction to Mathematical Cryptography*.  
Undergraduate Texts in Mathematics, Springer, 2008.



Joux, *Algorithmic Cryptanalysis*.  
CRC press, 2009.



Galbraith,  
*Mathematics of Public Key Cryptography*.  
Undergraduate Texts in Mathematics, Springer, 2012.

# Plan

---

Contexte

Vocabulaire

Repères historiques

Généralités

Cryptographie symétrique / asymétrique

# Plan

---

Contexte

Vocabulaire

Repères historiques

Généralités

Cryptographie symétrique / asymétrique

# Position du problème

---

## Caractéristiques des systèmes d'information

- Information numérique
- Communications sur un canal public
- Machines reliées par réseau
- Multi-utilisateurs

# Les acteurs

---



Alice

# Les acteurs

---



Alice



Bob

Mais aussi : Charlie, Eve...

[https://en.wikipedia.org/wiki/Alice\\_and\\_Bob](https://en.wikipedia.org/wiki/Alice_and_Bob)

Tous jouent à un jeu qu'on va d'abord tenter de définir.

# Les besoins de sécurité

---

- Confidentialité
  - Maintien au secret des informations vis-à-vis de tiers
- Intégrité
  - État des informations qui n'ont pas été modifiées
- Authenticité
  - Garantie de l'identité d'une entité ou de l'origine d'une communication
- Et aussi : non répudiation, vote électronique, divulgation nulle de connaissance etc

# Situations d'usage (1/2) : le chiffrement

---

Les propriétés offertes par la cryptographie sont souvent utiles.

- Courrier électronique :
  - Si je ne veux surtout pas que ma petite sœur lise le contenu.
  - Si je ne veux surtout pas que la NSA lise le contenu.
- Disque dur. Je **chiffre** mon disque dur pour protéger le contenu (informations confidentielles, vie privée) contre :
  - Le vol.
  - L'intrusion (laissez-nous votre PC monsieur, on l'inspecte...)
- Travail à distance (vpn, ssh) : quand il y a 2000km entre le clavier et l'ordinateur.
- Communication sensible : ma carte bancaire avec le terminal de paiement.

Ceci relève de la **confidentialité**.

Les données **chiffrées** ne doivent pas être **déchiffrables** par **l'adversaire**.

## Situations d'usage (2/2) : la signature

---

D'autres situations :

- Distributions de paquets logiciels : assurer que c'est un vrai, pas une version vérolée.
- Commerce en ligne : assurer qu'on parle bien à Amazon, pas à un pirate.
- Internet des Objets (IoT) : quand ma clef de voiture ouvre ma voiture à distance.
- Signature : créer un courrier électronique capable de faire foi.
- Authentification : Prouver qui on est. Ou qu'un document provient bien de la bonne autorité (ex : passeport).

Tout ceci relève davantage de l'**authenticité**.

On **signe** une donnée pour lui donner une garantie d'**authenticité**.

# Bien définir le problème

---

Souvent, il n'y a pas de réponse **unique** à un besoin de cryptographie.

- Tout dépend des hypothèses faites sur l'espion.
- Tout dépend des garanties qu'on souhaite obtenir.

Il faut être réaliste. Mon mail passe par gmail, **donc** la NSA l'écoute.

- En général, on suppose que l'attaquant est très fort, et on voit ce qu'on peut garantir.
- Si nécessaire, on raffine (mais si on peut obtenir des garanties maximales pour pas cher, on ne se prive pas).

# Moyens de protection

---

- Il existe plusieurs techniques :
  - Cryptographie
  - Sécurité informatique
  - Tempest
- Chaque technique propose des solutions contre certaines menaces
- Pour se protéger efficacement, il faut combiner les techniques

# La science du secret

---

De nombreuses applications dans la vie courante :

- *ssl, ssh, gpg, etc.*
- *carte bleue, téléphone cellulaire, WiFi, Bluetooth*
- *etc.*

**En quoi consiste cette science ?**

# Cryptologie

---

## Définition (Cryptologie)

Étude de la **protection de l'information sous forme numérique** contre des accès ou manipulations non-autorisés.

**cryptologie** = **cryptographie** + **cryptanalyse**

- **cryptographie** : conception des algorithmes cryptographiques
- **cryptanalyse** : évaluation de la sécurité des algorithmes cryptographiques

# Plan

---

Contexte

Vocabulaire

Repères historiques

Généralités

Cryptographie symétrique / asymétrique

# Vocabulaire

- Tous les mots corrects du vocabulaire d'un cryptographe ne se trouvent pas dans tous les dictionnaires communs.
- Internet est régulièrement truffé d'erreurs, en particulier en français et dans les médias.

Anglais	Français	Commentaire
Cipher	Chiffre	Rare (en français)
Cryptosystem	Cryptosystème	
Encrypt	Chiffrer	<del>Crypter</del>
Encryption	Chiffrement	<del>Chiffrage</del> <del>Cryptage</del>
Decrypt	Déchiffrer	
Decryption	Déchiffrement	<del>Décryptement</del> <del>Décryptage</del>
(Ad.) decrypt	Décrypter	L'adversaire décrypte,
(Ad.) decryption	Attaque	le correspondant déchiffre.

# Vocabulaire

---

D'autres termes ...

Anglais	Français
Cryptanalysis	Cryptanalyse
Block cipher	Chiffrement par blocs
Stream cipher	Chiffrement à flot
Plaintext	Message clair
Ciphertext	Message chiffré
Hash function	Fonction de hachage
Digest	Haché, ou empreinte

# Plan

---

Contexte

Vocabulaire

Repères historiques

Généralités

Cryptographie symétrique / asymétrique

# Cryptographie *artisanale*

---

Antiquité – 19e s. César (1er s. av. J.C.), Vigenère (1586),  
etc.  
Transpositions et substitutions al-  
phabétiques

# Cryptographie *mécanique*

---

1883 *La Cryptographie Militaire* [Kerckhoffs]  
Formalisation des systèmes de chiffrement

1926 *Cipher Printing Telegraph Systems for Secret Wire and Radio Telegraphic Communications* [Vernam]  
Chiffrement de Vernam (masque jetable)

1939-44 Enigma et les bombes de Bletchley Park

1950-60 Machines Hagelin

# Cryptographie *industrielle*

---

- 1949 *Communication Theory of Secrecy Systems* [Shannon]  
Notion de **sécurité inconditionnelle**
- 1973-77 Standardisation de **DES** (*Data Encryption Standard*)
- 1976 *New Directions in Cryptography* [Diffie-Hellman]  
Invention de la **cryptographie à clé publique**
- 1978 *A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems* [Rivest-Shamir-Adleman]  
Invention de **RSA**
- 1997-00 Standardisation d'**AES** (*Advanced Encryption Standard*)

# Plan

---

Contexte

Vocabulaire

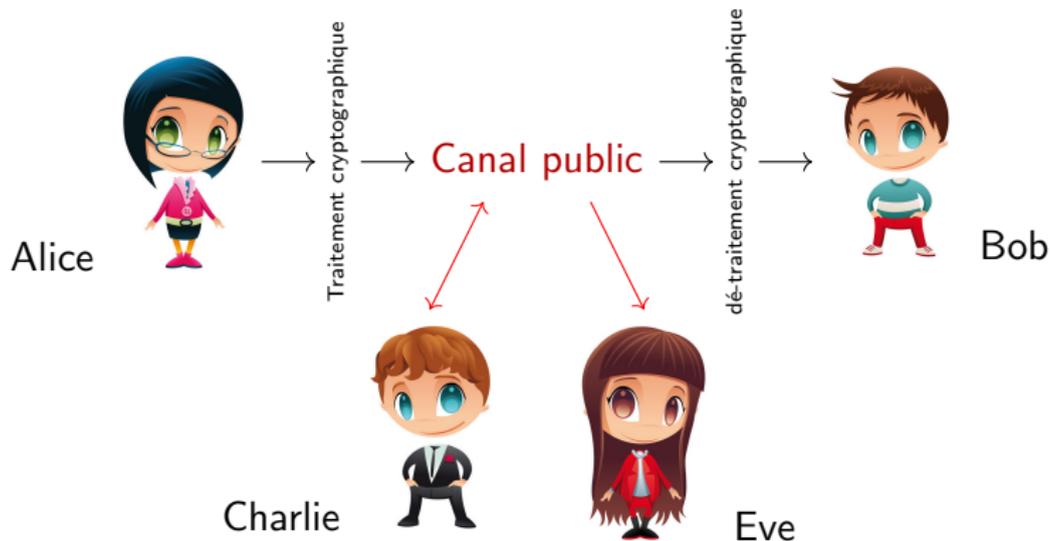
Repères historiques

Généralités

Cryptographie symétrique / asymétrique

# Modèle de communication

Modèle simplifié d'un système de communication cryptographique



- Charlie et Eve sont des **attaquants** (actif/passif).
- Le canal induit **du délai**, et **des intermédiaires**.

# Différentes menaces

---

Une attaque peut être

- attaque passive : **espionnage**



-  : attaque active ;

- **usurpation d'identité** (de l'émetteur ou du récepteur)
- **altération des données** = modification du contenu du message
- **répudiation du message** = l'émetteur nie l'avoir envoyé
- **répétition du message**
- **retardement de la transmission**
- **destruction du message**

- Approximation raisonnable pour les attaques actives : **le canal est l'attaquant.**

# Motivations et cibles

---

- Des attaques aux motivations très variées
  - Ludique : amusement, curiosité, défi, réputation
  - Idéologie (voire terrorisme) : vandalisme, déni de service
  - Cupidité : vol de données bancaires, extorsion (*ransomware*)
  - Espionnage : industriel (concurrence) ou étatique (surveillance)
- Tout système d'information est une cible potentielle
  - Infrastructures «vitaales» : réseaux électrique, de communications, de transports, centrales nucléaires, hôpitaux
  - États : sites gouvernementaux et militaires
  - Entreprises : cyber-espionnage, vengeance
  - Entités académiques : universités, laboratoires de recherche
  - Individus : cibles vulnérables, peu sensibilisées, ne maîtrisent pas toutes les données qu'elles produisent ; leurs machines peuvent aussi servir de relais (*botnet*)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, etc.)
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Utilisateurs
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, etc.)
  
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Utilisateurs
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, etc.)
  - Primitives cryptographiques (AES, RSA, etc.)
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Utilisateurs
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, SSL/TLS, etc.)
  - Primitives cryptographiques (AES, RSA, etc.)
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Utilisateurs
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, SSL/TLS, etc.)
  - Primitives cryptographiques (AES, RSA, etc.)
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)
- Chaque couche présente des **vulnérabilités** et donc autant de **risques d'attaque**

# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Utilisateurs
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, SSL/TLS, etc.)
  - Primitives cryptographiques (AES, RSA, etc.)
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)
- Chaque couche présente des **vulnérabilités** et donc autant de **risques d'attaque**
- Attaque **sophistiquée** : plusieurs vecteurs d'attaque **exploités conjointement**

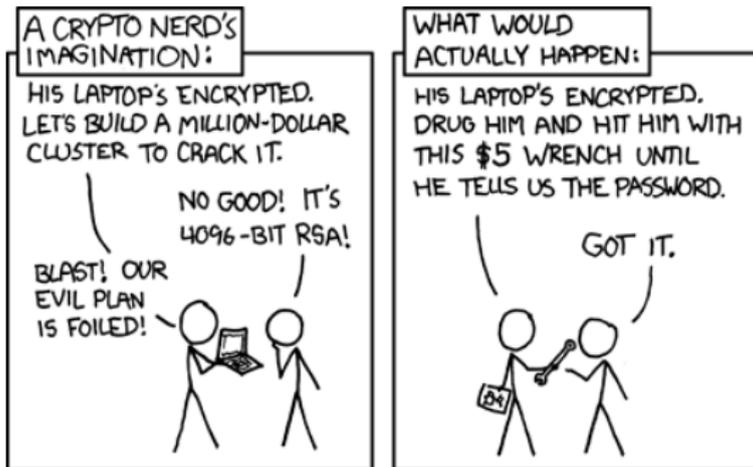
# Modèle simplifié de système d'information

---

- Superposition de plusieurs couches
  - Utilisateurs
  - Protocoles (IP, TCP, HTTP, SSL/TLS, etc.)
  - Primitives cryptographiques (AES, RSA, etc.)
  - Programmes et bibliothèques logicielles
  - Système d'exploitation
  - Matériel (machines, routeurs, câbles, etc.)
- Chaque couche présente des **vulnérabilités** et donc autant de **risques d'attaque**
- Attaque **sophistiquée** : plusieurs vecteurs d'attaque **exploités conjointement**
- Besoin d'un plan de **sécurité globale** : analogie de la porte blindée et des fenêtres ouvertes

# Limites de la cryptographie

La cryptographie n'est pas la réponse à tous les besoins de sécurité :



Elle doit être utilisée avec des mesures complémentaires en fonction des menaces.

Un attaquant attaque toujours le maillon le plus faible (souvent l'utilisateur).

# Objectifs versus scénario d'attaque

---

Si on recherche l'objectif de **l'authenticité** ou de **l'intégrité**, alors nécessairement notre hypothèse de raisonnement est celle d'une attaque **active**.



Si on recherche l'objectif de la **confidentialité**, on peut réfléchir soit à une attaque passive, soit à une attaque active.

# Les primitives cryptographiques

---

Algorithmes fournissant une fonctionnalité cryptographique élémentaire

- contrôle d'intégrité → fonction de hachage
- génération de clés → générateur d'aléa
- authentification → code d'authentification de message, algorithme de signature
- confidentialité → chiffrement

# Plan

---

Contexte

Vocabulaire

Repères historiques

Généralités

Cryptographie symétrique / asymétrique

# Cryptographie symétrique / asymétrique

---

Quand on cherche la **confidentialité**



- $D$  se déduit facilement de  $E \Rightarrow$  **crypto symétrique**
- $D$  **ne** se déduit **pas** facilement de  $E \Rightarrow$  **crypto asymétrique**

# Cryptographie symétrique / asymétrique

---

Quand on cherche la confidentialité



- $D$  se déduit facilement de  $E \Rightarrow$  crypto symétrique
- $D$  ne se déduit pas facilement de  $E \Rightarrow$  crypto asymétrique

# Cryptographie symétrique / asymétrique

---

Quand on cherche l'**authenticité**



- $A$  se déduit facilement de  $V \Rightarrow$  crypto symétrique
- $A$  ne se déduit pas facilement de  $V \Rightarrow$  crypto asymétrique

# Cryptographie symétrique / asymétrique

---

Quand on cherche l'authenticité



- $A$  se déduit facilement de  $V \Rightarrow$  crypto symétrique
- $A$  ne se déduit pas facilement de  $V \Rightarrow$  crypto asymétrique

# Les algorithmes cryptographiques

---

- Un algorithme :
  - est long à concevoir
  - doit être implanté sur du matériel
  - doit être transmis aux utilisateurs
  - doit être maintenu
- Confidentialité  $\Rightarrow$  déchiffrement possible **seulement** par le récepteur
- Authentification  $\Rightarrow$  authentifiant calculable **seulement** par l'émetteur
- Les algorithmes doivent-ils être secrets ?

# Les algorithmes cryptographiques

---

- Un algorithme :
  - est long à concevoir
  - doit être implanté sur du matériel
  - doit être transmis aux utilisateurs
  - doit être maintenu
- Confidentialité  $\Rightarrow$  déchiffrement possible **seulement** par le récepteur
- Authentification  $\Rightarrow$  authentifiant calculable **seulement** par l'émetteur
- Les algorithmes doivent-ils être secrets ?  
Si le secret tombe entre les mains de l'ennemi, c'est fichu.

# Les desiderata de Kerckhoffs (1883)

---

1. Le système doit être **matériellement**, sinon **mathématiquement**, **indéchiffrable** ;
2. Il faut qu'il **n'exige pas** le **secret** [...]
3. La **clef** doit pouvoir en être [...] retenue sans le secours de notes écrites, et être changée [...]
4. Il faut qu'il soit applicable à la correspondance **télégraphique** ;
5. Il faut qu'il soit **portatif** [...]
6. Enfin, il est nécessaire [...] que le système soit d'un **usage facile**, [...]

# Cryptographie avec clé



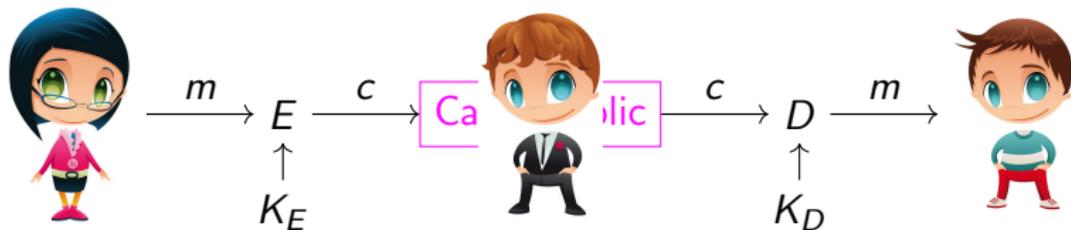
- $D = E$  et  $K_D = K_E$  (resp  $A = V$  et  $K_A = K_V$ ) : **crypto symétrique**
- Sinon, clés potentiellement distinctes :  $\Rightarrow$  **crypto asymétrique**

# Cryptographie avec clé



- $D = E$  et  $K_D = K_E$  (resp  $A = V$  et  $K_A = K_V$ ) : **crypto symétrique**
- Sinon, clés potentiellement distinctes :  $\Rightarrow$  **crypto asymétrique**

# Cryptographie avec clé



- $D = E$  et  $K_D = K_E$  (resp  $A = V$  et  $K_A = K_V$ ) : **crypto symétrique**
- Sinon, clés potentiellement distinctes :  $\Rightarrow$  **crypto asymétrique**

# Retour sur le modèle de communication

---

Différents types de **canaux de communications** :

- **public** (ni authentifié ni confidentiel) — ex. Internet [universel]
- **authentifié** — ex. (partiellement) le réseau téléphonique [voix]
- **confidentiel** — ex. le réseau postal [loi]
- **authentifié et confidentiel** — ex. le téléphone rouge [dédié]

**Sécurité, disponibilité, débit, coût** variables

# Intervention de la cryptographie

---

Construire des canaux **authentifiés** et/ou **confidentiels** à partir

- d'un canal **public** et
- d'un canal **authentifié** et/ou **confidentiel**

Utilisation **différente** et/ou **asynchrone** des canaux  $\Rightarrow$  souplesse d'utilisation, nouvelles fonctionnalités, *etc.*

# Exemple : améliorer un canal authentifié

---

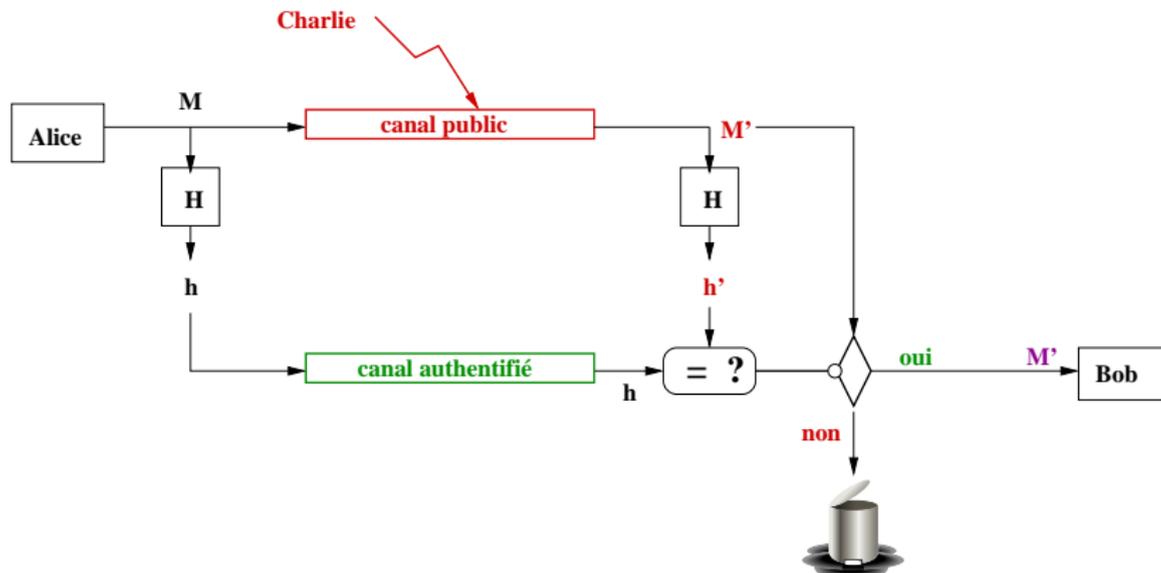
## Contrôle d'intégrité avec fonction de hachage

- Un canal public pour transmettre des messages de grande taille
- Un canal authentifié pour transmettre un **contrôle d'intégrité** de petite taille

### Définition (partielle)

Une **fonction de hachage** est un algorithme (efficace) qui calcule une valeur de **taille fixe**, appelée **empreinte** ou **haché**, à partir de messages de **taille quelconque**.

# Améliorer un canal authentifié



- On utilise le canal authentifié **après** la création du message
- Exemple “folklorique” : juste **un autre** canal pour transmettre  $h$  ; “Charlie n’est pas partout” .

# Modèle d'attaques

---

- Pour que  $H$  soit qualifié de **cryptographique**, il faut que  $H$  résiste aux attaques par calcul de
  - **premier antécédent** :  
étant donné  $y$  il est difficile de trouver  $x$  tel que  $y = H(x)$
  - **deuxième antécédent** :  
étant donné  $(x, H(x))$  il est difficile de trouver  $x'$  tel que  $H(x') = H(x)$
  - **collision** :  
il est difficile de trouver  $x$  et  $x'$  tels que  $H(x') = H(x)$
- La pertinence des modèles d'attaques dépend des applications.

# Créer un canal authentifié (I)

---

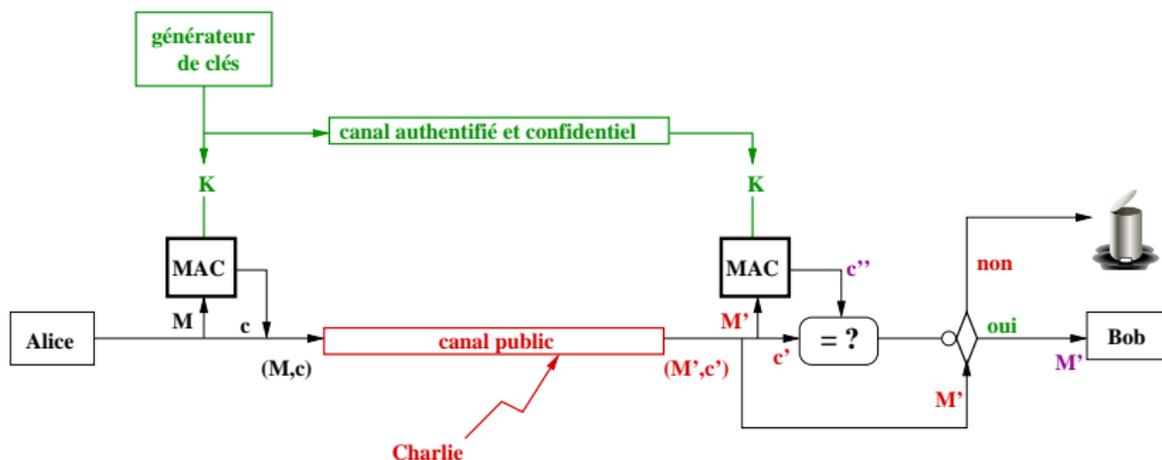
Symétrique : code d'authentification de messages (MAC)

- Un canal public pour transmettre des messages et leur code d'authentification
- Un canal authentifié et confidentiel pour transmettre la clé secrète

## Définition (partielle)

Un code d'authentification de message (MAC) est un algorithme qui calcule une valeur de taille fixe, appelée (aussi) MAC, à partir de messages de taille quelconque et d'une clé secrète partagée entre émetteur et récepteur.

# Créer un canal authentifié (I)



- On utilise le canal authentifié et confidentiel **préalablement** au message
- Exemple évident : pratiquement tous les protocoles Internet avec un peu de sécurité.

# Modèle d'attaques

---

- Connaissant certains couples  $(M, c)$ , un attaquant ne doit pas pouvoir
  - retrouver la clé secrète  $K$
  - créer un nouveau couple  $(M', c')$  valide sans connaître la clé secrète  $K$
  - distinguer l'algorithme de MAC d'une fonction aléatoire
- Le **contrôle d'intégrité** est assuré sur le canal public par l'authentification de l'origine des messages.

Les MAC sont un outil fondamental, et parfois assez subtil à mettre en œuvre. Il y a des pièges.

# Créer un canal authentifié (II)

---

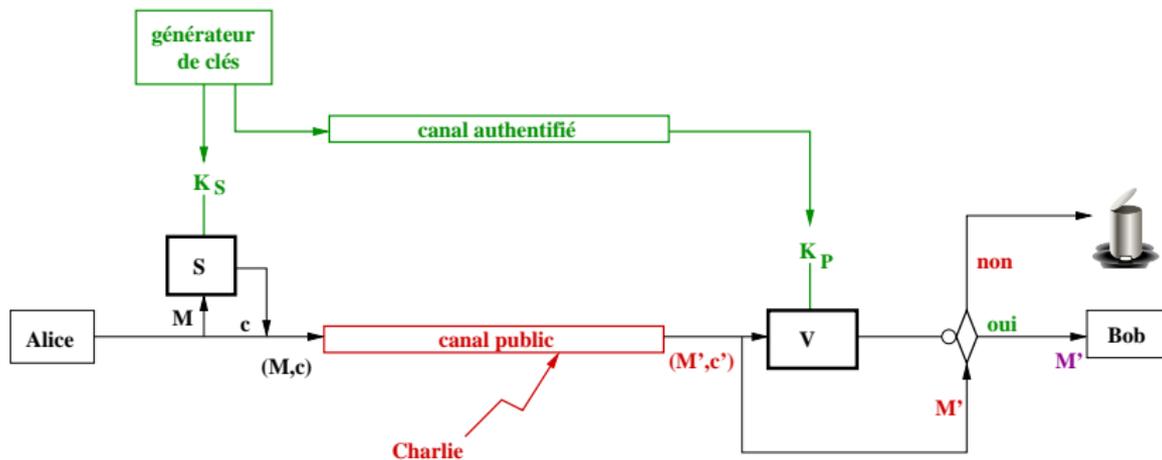
Asymétrique : un algorithme de signature

- Un canal public pour transmettre des messages et leur signature
- Un canal authentifié pour transmettre la clé publique

## Définition (partielle)

Un algorithme de signature calcule une valeur appelée signature, usuellement de taille fixe, à partir de messages de taille quelconque et de la clé privée de l'émetteur. La vérification par le récepteur se fait grâce à la clé publique de l'émetteur.

# Créer un canal authentifié (II)



- On utilise le canal authentifié **préalablement** au message
- La clé de signature  $K_S$  **ne transite pas**. Elle est propre à Alice.

# Modèle d'attaques

---

- Connaissant certains couples  $(M, c)$  et la clé publique  $K_P$ , un attaquant ne doit pas pouvoir
  - retrouver la clé privée  $K_S$
  - créer un nouveau couple  $(M', c')$  valide sans connaître la clé privée  $K_S$
  - distinguer l'algorithme de signature d'une fonction aléatoire
- Le contrôle d'intégrité est assuré sur le canal public par l'authentification de l'origine des messages.

# Authentification/Signature

---

- L'**authentification** permet de répondre à la question :

Qui a émis le message ?

Mais qui pose la question ?

- **MAC** : l'autre possesseur de la clé secrète  $\Rightarrow$  1 personne  
2 personnes peuvent calculer l'authentifiant
- **Signature** : un possesseur de la clé publique  $\Rightarrow$  tout le monde  
Une seule personne peut calculer l'authentifiant  $\Rightarrow$   
**non-répudiation**

Seule la solution de crypto asymétrique permet la non-répudiation et des signatures vérifiables par des tiers.

# Créer un canal confidentiel (I)

---

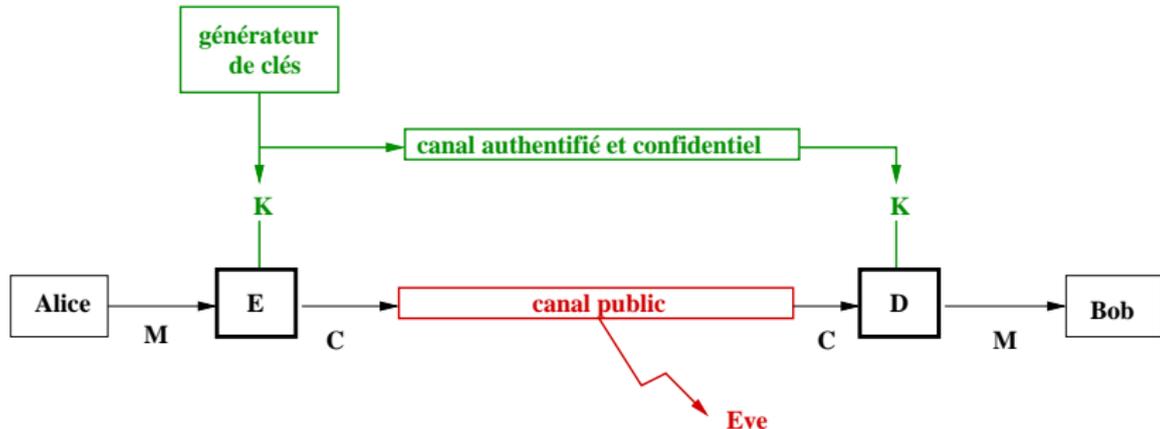
Symétrique : un chiffrement à clé secrète

- Un canal public pour transmettre des messages **chiffrés**
- Un canal authentifié **et** confidentiel pour transmettre la **clé secrète**

## Définition (partielle)

Un **chiffrement à clé secrète**,  $E$ , est un algorithme paramétré par une chaîne binaire **secrète**,  $K$ , partagée entre **deux entités** qui transforme un **message clair**  $M$  en un **message chiffré**  $C$ . Le déchiffrement associé,  $D$ , utilise le même paramètre  $K$ .

# Créer un canal confidentiel (I)



- On a besoin du canal authentifié et confidentiel au préalable de l'envoi d'un nombre élevé de messages

# Modèle d'attaques

---

- Connaissant certains couples  $(M, C)$  et un chiffré  $C_0$ , un attaquant ne doit pas pouvoir
  - retrouver la clé secrète  $K$
  - retrouver le clair  $M_0$  correspondant à  $C_0$  sans connaître la clé secrète  $K$
  - distinguer  $C_0$  d'une suite aléatoire ( $\Rightarrow$  randomisation)
- **Attention** : chiffrer  $\neq$  authentifier (ce n'est pas le même modèle de sécurité)

## Créer un canal confidentiel (II)

---

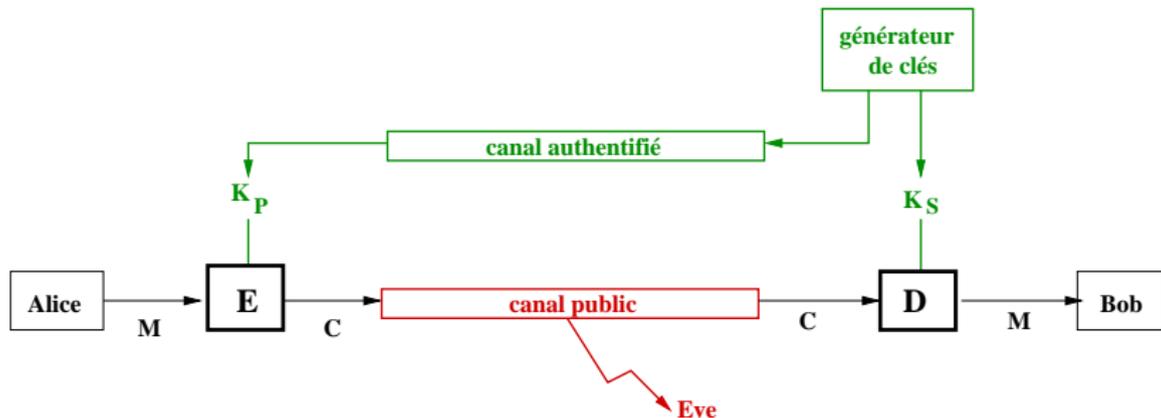
Asymétrique : utiliser un chiffrement à clé publique

- Un canal public pour transmettre des messages **chiffrés**
- Un canal authentifié pour transmettre la **clé publique**

### Définition (partielle)

Un **chiffrement à clé publique**,  $E$ , est un algorithme paramétré par une chaîne binaire **publique**,  $K_P$ , connue de tous qui transforme un **message clair**  $M$  en un **message chiffré**  $C$ . Le déchiffrement associé  $D$  utilise un paramètre **privé**  $K_S$ .

# Créer un canal confidentiel (II)



- On a besoin du canal authentifié **une fois** au préalable

# Modèle d'attaques

---

- Connaissant certains couples  $(M, C)$ , un chiffré  $C_0$ , et la clé publique  $K_P$ , un attaquant ne doit pas pouvoir
  - retrouver la clé privée  $K_S$
  - retrouver le clair  $M_0$  correspondant à  $C_0$  sans connaître la clé privée  $K_S$
  - distinguer  $C_0$  d'une suite aléatoire ( $\Rightarrow$  randomisation)
- **Attention** : chiffrer  $\neq$  authentifier (ce n'est pas le même modèle de sécurité)

Au fait : pourquoi veut-on un canal authentifié ?

# Chiffrement à clé secrète : le coffre-fort

---

- Alice et Bob ont la clé du coffre
- Alice envoie un message à Bob
  1. Alice utilise la clé pour déposer un courrier dans le coffre ;
  2. Bob utilise la clé pour lire le courrier déposé par Alice.
- Propriétés du coffre-fort
  - seuls Alice et Bob peuvent déposer du courrier dans le coffre ;
  - seuls Alice et Bob peuvent retirer le courrier déposé dans le coffre.

# Chiffrement à clé publique : la boîte aux lettres

---

- Seul Bob a la clé de sa boîte
- Alice obtient l'adresse de Bob dans un annuaire
- Alice envoie un message à Bob
  1. Alice dépose un courrier dans la boîte de Bob ;
  2. Bob utilise sa clé pour retirer le courrier déposé dans sa boîte.
- Propriétés de la boîte aux lettres
  - tout le monde peut envoyer du courrier à Bob ;
  - seul Bob peut lire le courrier déposé dans sa boîte aux lettres.

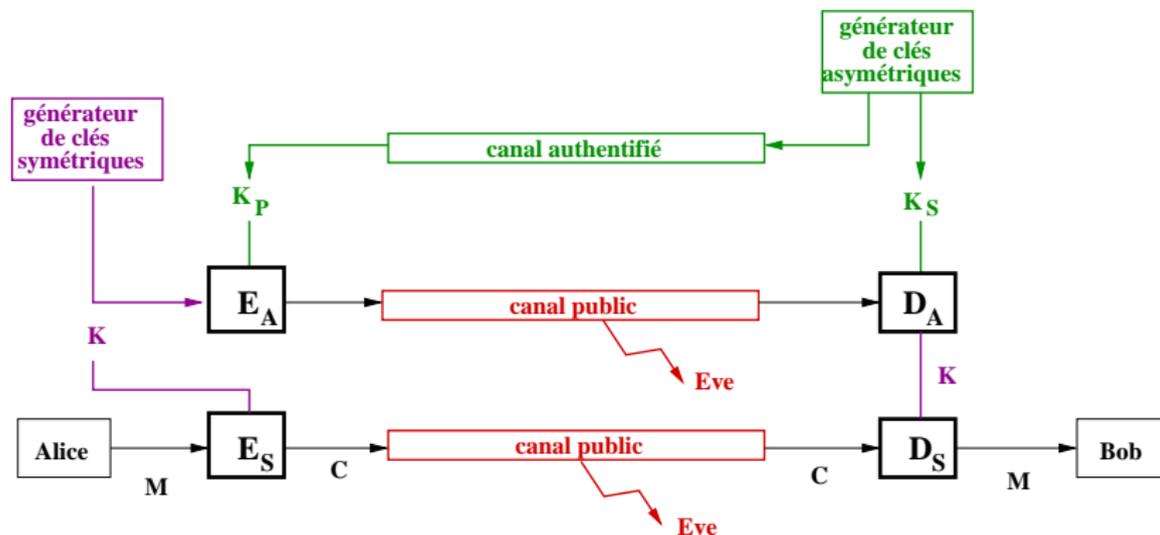
# Algorithmes à clé secrète / à clé publique

---

	<b>clé secrète</b>	<b>clé publique</b>
<b>gestion</b>	la clé est secrète aux <b>deux extrémités</b> canal auxiliaire <b>authentifié et confidentiel</b>	seule la <b>clé privée</b> est secrète canal auxiliaire <b>authentifié</b>
<b>sécurité</b>	<b>pas de preuve formelle</b> de sécurité	repose sur la difficulté supposée de <b>problèmes mathématiques</b>
<b>taille clé</b>	ex. <b>AES</b> : 128 bits	ex. <b>RSA</b> : 3072 bits
<b>perf.</b>	<b>très rapides</b> 10-100 Mbits/s (software)	<b>très lents</b> 10-100 Kbits/s

# Créer un canal confidentiel (III)

Utiliser un système hybride



# Canal confidentiel

---

Le schéma précédent est pratiquement universel (SSL, IPSEC, SSH, ...).

- Alice et Bob doivent d'abord s'entendre sur les algorithmes de crypto qu'ils vont utiliser (*suite cryptographique*).
- Divers mécanismes sont utilisés pour l'authentification initiale.
- Une phase d'*échange de clé* emploie d'abord un système asymétrique. Alice et Bob en déduisent une *clé de session*.
- La *clé de session* est utilisée pour chiffrer la suite des échanges.
- Selon le protocole, des *renégociations* de clé de session peuvent intervenir périodiquement.

# Quelques leçons de l'histoire

---

- **Les desiderata de Kerckhoffs** : la sécurité **ne doit pas** reposer sur le secret des spécifications
- **La loi de Moore** : la puissance des processeurs double tous les 18 mois, gare à la **recherche exhaustive**
- **La loi de Murphy** : un **trou de sécurité** finira toujours par être découvert... au pire moment
- **Le principe de réalité** : un procédé **inadapté** (cher, contraignant, lent, etc.) ne sera pas utilisé
- **Ne pas réinventer la roue** : utiliser un standard / une librairie existante plutôt que faire son propre algorithme cryptographique (surtout si on n'est pas expert...)