Les protocoles cryptographiques: comment sécuriser nos communications ?

Stéphanie Delaune

Chargée de recherche CNRS au LSV,

INRIA projet SecSI & ENS Cachan

23 Octobre 2011

ENS Cachan

- 17 départements d'enseignement: mathématiques, informatique, chimie, génie mécanique, sciences sociales, ...
- 14 laboratoires de recherche:

Laboratoire Spécification & Vérification

L'enseignement à l'ENS Cachan

$\longrightarrow$ formation tournée vers les **fondements de l'informatique**

L'enseignement à l'ENS Cachan

$\longrightarrow$ formation tournée vers les **fondements de l'informatique**

- Les bases: calculabilité et logique, algorithmique, complexité, langages formels, programmation, ...
- Des enseignements plus poussés: preuves assistées par ordinateur, démonstration automatique, bioinformatique, ...

L'enseignement à l'ENS Cachan

$\longrightarrow$ formation tournée vers les **fondements de l'informatique**

- Les bases: calculabilité et logique, algorithmique, complexité, langages formels, programmation, ...
- Des enseignements plus poussés: preuves assistées par ordinateur, démonstration automatique, bioinformatique, ...

« La science informatique n'est pas plus la science des ordinateurs que l'astronomie n'est celle des téléscopes »

E. Dijkstra

La recherche au LSV

$\longrightarrow$ accroître notre confiance dans les logiciels critiques

La recherche au LSV

$\longrightarrow$ accroître notre confiance dans les logiciels critiques

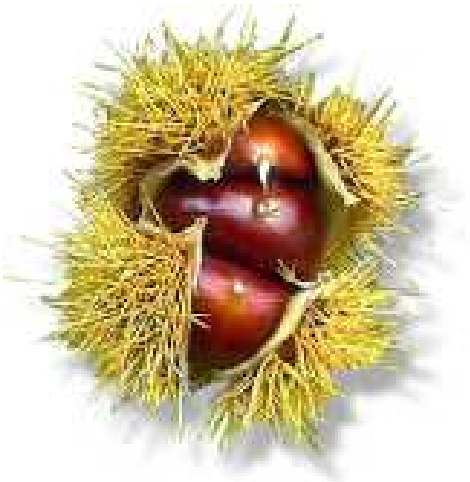
- logiciel: texte relativement long écrit dans un langage spécifique et qui sera exécuté par un ordinateur
- critique: une défaillance peut avoir des conséquences désastreuses en termes humains ou économiques

La recherche au LSV

Ennemi public numéro 1: le bug ...

La recherche au LSV

Ennemi public numéro 1: le bug ...



... aussi connu sous le nom de bogue !

Dans la vie quotidienne !

Dans la vie quotidienne !

Ariane V - 4 juin 1996

Un crash après 40 secondes de vol dû

...

Ariane V - 4 juin 1996

Un crash après 40 secondes de vol dû

...

à un bug logiciel !

1. 189 vols réussis pour Ariane IV,
2. réutilisation du logiciel de lancement d'Ariane IV,
3. ajout du nécessaire pour la nouvelle fusée.

$\longrightarrow$ Le logiciel d'Ariane IV contenait un bug !

Sonde Mars Climate Orbiter - 26 septembre 1999

Perte de la sonde due ...

Sonde Mars Climate Orbiter - 26 septembre 1999

Perte de la sonde due ... à un problème d'unité de mesure !

Carte bancaire

La carte bleue est protégée par un grand nombre public dont on ne connait pas la factorisation.

Carte bancaire

La carte bleue est protégée par un grand nombre public dont on ne connait pas la factorisation.

Nombre de 96 chiffres

213598703592091008239502270499962879705109534182641740644252
416500858395774644508840500943086599 9

Carte bancaire

La carte bleue est protégée par un grand nombre public dont on ne connait pas la factorisation.

Nombre de 96 chiffres

213598703592091008239502270499962879705109534182641740644252
4165008583957746445088405009430865999

Affaire Serge Humpich (1997)

il factorise ce nombre de 96 chiffres et conçoit de fausses cartes bleues (les « YesCard »).

Carte bancaire

La carte bleue est protégée par un grand nombre public dont on ne connait pas la factorisation.

Nombre de 96 chiffres

213598703592091008239502270499962879705109534182641740644252
416500858395774644508840500943086599 9

Affaire Serge Humpich (1997)

il factorise ce nombre de 96 chiffres et conçoit de fausses cartes bleues (les « YesCard »).

$\longrightarrow$ Depuis, le nombre utilisé pour sécuriser les cartes bancaires comportent 232 chiffres.

Difficultés et enjeux

$\longrightarrow$ une petite modification (quelques caractères) peut le transformer complètement.

Un besoin crucial de vérification

- pour des raisons économiques
  $\longrightarrow$ Ariane 5, carte bancaire, ...
- mais parfois il y a aussi des vies humaines en jeu
  $\longrightarrow$ la machine Therac-25 dans les années 80
  $\longrightarrow$ logiciels embarqués dans les voitures, les avions, ...

Comment fait-on ?

Tests

- à la main ou génération automatique;
- vérification d'un nombre fini de cas.

Comment fait-on ?

Tests

- à la main ou génération automatique;
- vérification d'un nombre fini de cas.

$\infty \infty \infty$ Accéder à l'infini: un rêve impossible ? $\infty \infty \infty$

Comment fait-on ?

Tests

- à la main ou génération automatique;
- vérification d'un nombre fini de cas.

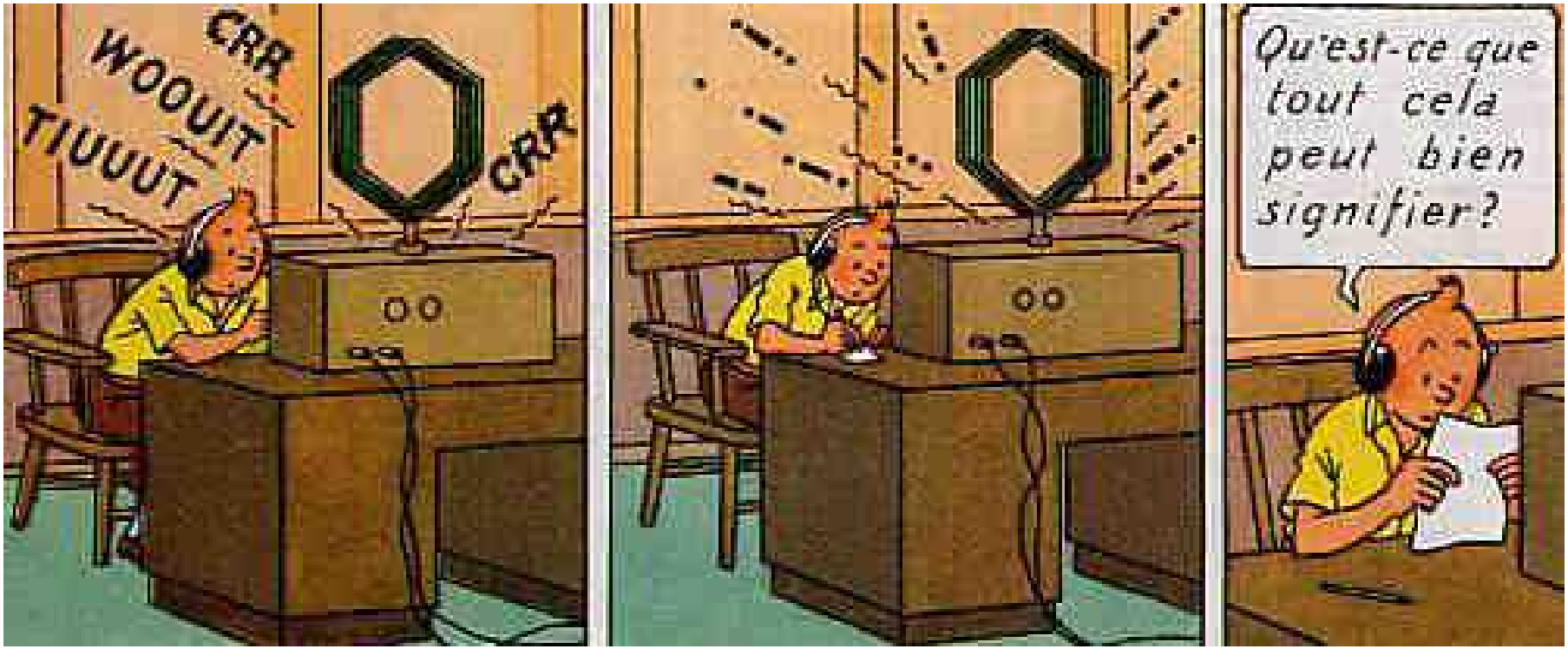
$\infty \infty \infty$ Accéder à l'infini: un rêve impossible ? $\infty \infty \infty$

Vérification (preuves formelles)

$\longrightarrow$ preuves mathématiques

- à la main ou à l'aide d'ordinateur;
- vérification de tous les cas possibles;
- plus difficile.

Les protocoles cryptographiques: comment sécuriser nos communications ?



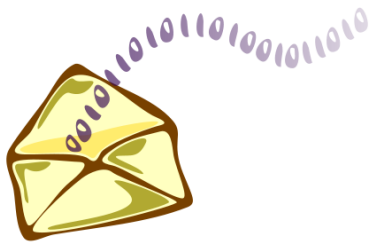
Les protocoles cryptographiques

- petits programmes destinés à sécuriser les communications
- omniprésents: paiement sur internet, e-administration (impôts), distributeurs de billets, téléphonie mobile. . .

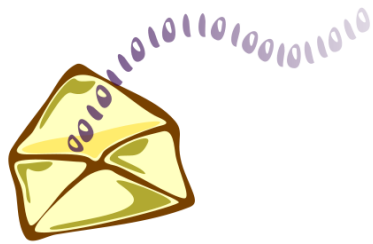
Internet

Le réseau de communication est non fiable !

Une ville imaginaire ....



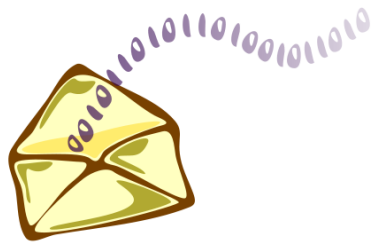
Une ville imaginaire ....



... mais le postier est malhonnête, il

- peut intercepter les messages,
- peut changer le nom de l'expéditeur du courrier,
- peut distribuer des faux messages,
- ...

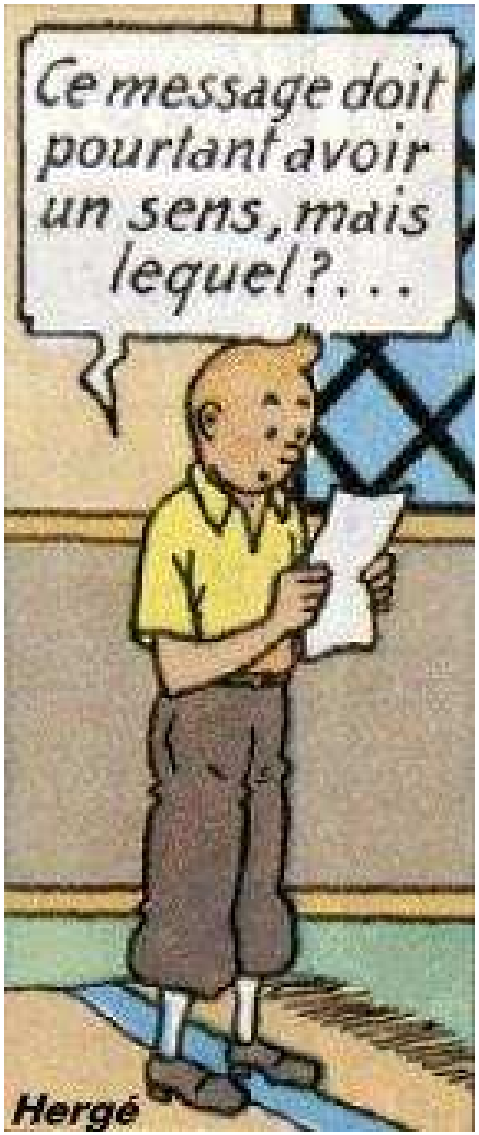
Une ville imaginaire ....



... mais le postier est malhonnête, il

- peut intercepter les messages,
- peut changer le nom de l'expéditeur du courrier,
- peut distribuer des faux messages,
- ...

Il faut protéger les messages !

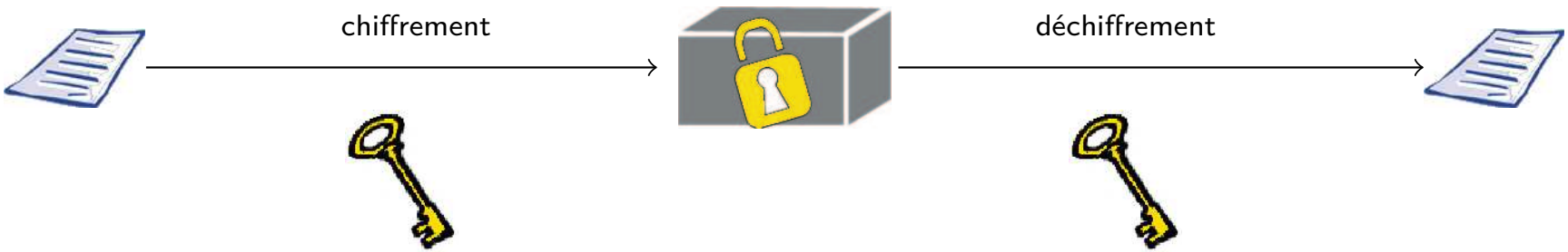


Le chiffrement

« DVVRF LDWLR QGHVS
URIHV VHXUV GHPDW
KPDWL TXHVG HOHQV
HLJQH PHQWS XEOLF »

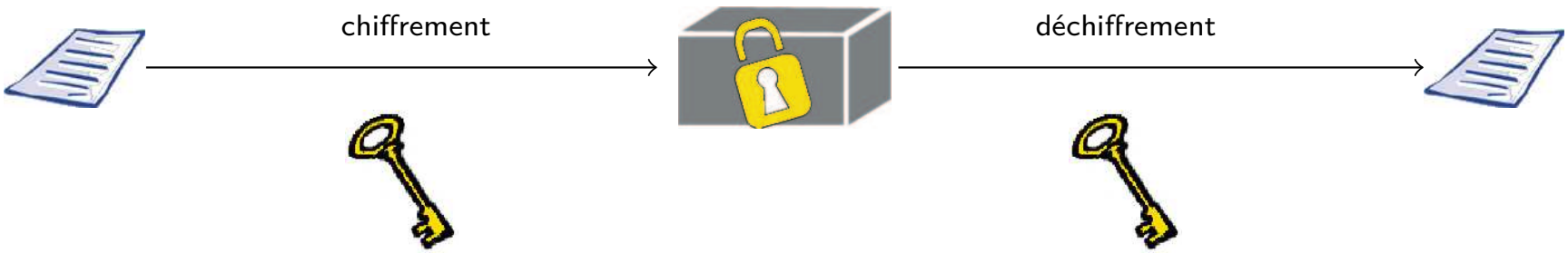
Qu'est-ce que le chiffrement ?

Chiffrement Symétrique



Qu'est-ce que le chiffrement ?

Chiffrement Symétrique



- plus ancienne forme de chiffrement,
- traces de son utilisation par les Égyptiens vers 2000 avant J.-C.

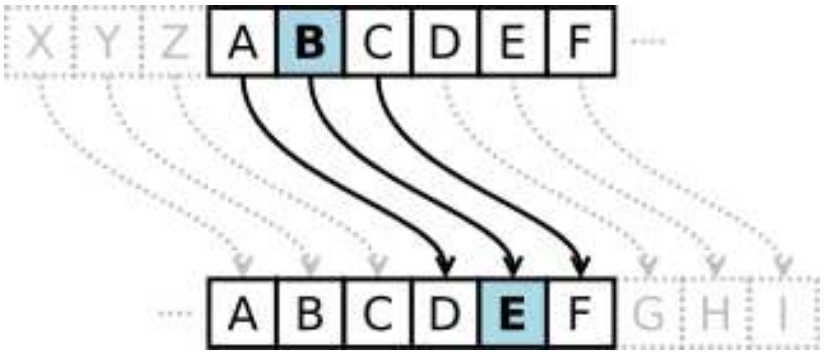
Chiffrement de César

Cette méthode consiste à décaler les lettres de l'alphabet d'un nombre fixé de crans

Chiffrement de César

Cette méthode consiste à décaler les lettres de l'alphabet d'un nombre fixé de crans

Exemple: Un décalage de 3.

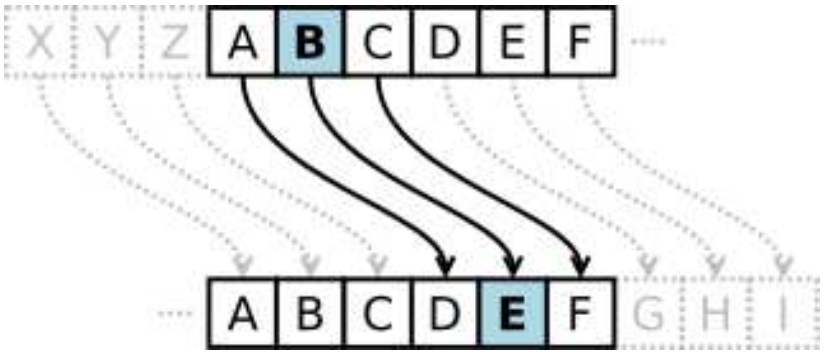


ASSOCIATION DES PROFESSEURS DE MATHÉMATIQUES DE L'ENSEIGNEMENT PUBLIC

Chiffrement de César

Cette méthode consiste à décaler les lettres de l'alphabet d'un nombre fixé de crans

Exemple: Un décalage de 3.



ASSOCIATION DES PROFESSEURS DE MATHÉMATIQUES DE L'ENSEIGNEMENT PUBLIC

DVVRF LDWLR QGHVS URIHV VHXUV GHPDW
KPDWL TXHVG HOHQV HLJQH PHQWS XEOLF

Seconde Guerre mondiale (1939-1945)

Enigma

- machine électro-mécanique portable d'origine allemande,
- nombreuses permutations.

Un peu d'histoire ...

- 1945: La plupart des messages codés allemands étaient décryptés en un jour ou deux.
- Alan Turing a beaucoup contribué à « casser » cette méthode de chiffrement.

Seconde Guerre mondiale (1939-1945)

Enigma

- machine électro-mécanique portable d'origine allemande,
- nombreuses permutations.

Un peu d'histoire ...

- 1945: La plupart des messages codés allemands étaient décryptés en un jour ou deux.
- Alan Turing a beaucoup contribué à « casser » cette méthode de chiffrement.

$\longrightarrow$ aujourd'hui, le DES (développé par IBM) utilise les mêmes ingrédients

Et aujourd'hui ...

Exemple: DES - Data Encryption Standard
$\longrightarrow$ un produit développé par IBM (1977)

Chiffrement symétrique aujourd'hui

utilise les mêmes ingrédients qu'auparavant (décalages et mélanges)

Et aujourd'hui ...

Exemple: DES - Data Encryption Standard
$\longrightarrow$ un produit développé par IBM (1977)

Chiffrement symétrique aujourd'hui

utilise les mêmes ingrédients qu'auparavant (décalages et mélanges)

Securité:

- pas de sécurité prouvée,
- la seule chose que l'on sait prouver est la résistance face à des types d'attaques connues, pour les autres ...

Et aujourd'hui ...

Exemple: DES - Data Encryption Standard
$\longrightarrow$ un produit développé par IBM (1977)

Chiffrement symétrique aujourd'hui

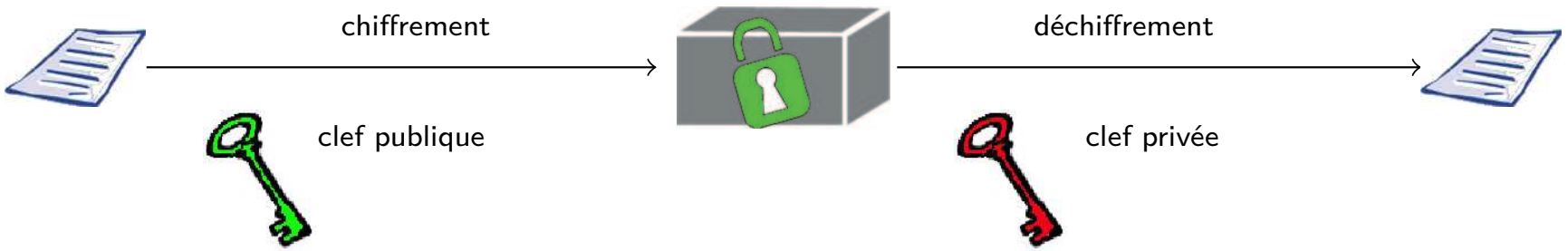
utilise les mêmes ingrédients qu'auparavant (décalages et mélanges)

Securité:

- pas de sécurité prouvée,
- la seule chose que l'on sait prouver est la résistance face à des types d'attaques connues, pour les autres ...

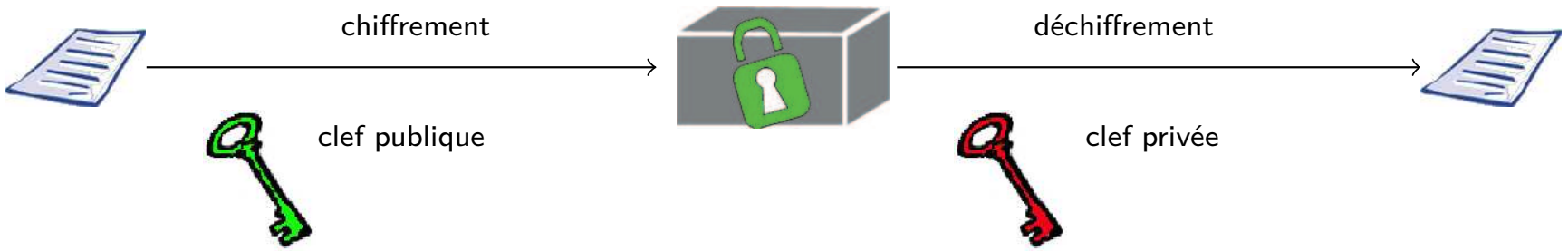
DES est maintenant considéré non sûr pour de nombreuses applications
$\longrightarrow$ Triple DES ou AES

Chiffrement asymétrique



Chiffrement asymétrique (ou à clefs publiques)

Chiffrement asymétrique

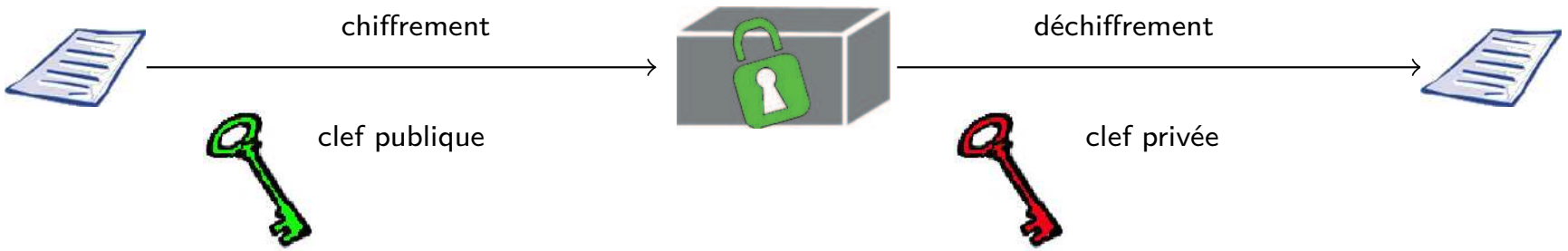


1977: chiffrement RSA (encore utilisé à l'heure actuelle)

- cette méthode de chiffrement repose sur un problème mathématique bien connu: le problème de la factorisation.

Chiffrement asymétrique (ou à clefs publiques)

Chiffrement asymétrique



1977: chiffrement RSA (encore utilisé à l'heure actuelle)

- cette méthode de chiffrement repose sur un problème mathématique bien connu: le problème de la factorisation.

Tant que nous ne sommes pas capables de résoudre ce problème d'une façon efficace, la méthode de chiffrement RSA sera considérée sûre.

RSA - Rivest, Shamir and Adleman

$\longrightarrow$ méthode de chiffrement proposée par Rivest, Shamir et Adleman en 1977

clef publique	clef privée
$n = pq$	d
e	tel que $e \times d = 1 \bmod \phi(n)$

RSA - Rivest, Shamir and Adleman

$\longrightarrow$ méthode de chiffrement proposée par Rivest, Shamir et Adleman en 1977

clef publique	clef privée
$n = pq$	d
e	tel que $e \times d = 1 \bmod \phi(n)$

Chiffrement $\quad m \longrightarrow m^e \ mod \ n$

Déchiffrement $\quad c \longrightarrow c^d \ mod \ n$

RSA - Rivest, Shamir and Adleman

$\longrightarrow$ méthode de chiffrement proposée par Rivest, Shamir et Adleman en 1977

clef publique	clef privée
$n = pq$	d
e	tel que $e \times d = 1 \bmod \phi(n)$

Chiffrement $\quad m \longrightarrow m^e \bmod n$

Déchiffrement $\quad c \longrightarrow c^d \bmod n$

$$m \xrightarrow{\textit{chiffrement}} m^e \bmod n \xrightarrow{\textit{dechiffrement}} (m^e \bmod n)^d \bmod n$$
$$= m^{ed} \bmod n$$
$$= m^1 \bmod n.$$
$$= m \bmod n.$$

Sécurité du chiffrement RSA

$\longrightarrow$ essentiellement basée sur le problème mathématique suivant:

Factorisation des grands nombres

décomposer un nombre en nombre n en nombres premiers $p_1, \ldots, p_k$ tel que

$$n = p_1 \times p_2 \times \ldots \times p_k$$

$\longrightarrow$ Tant que nous ne sommes pas capables de résoudre ce problème d'une façon efficace, la méthode de chiffrement RSA sera considérée sûre.

Casser le chiffrement RSA

Les challenges RSA

- défis lancés par le laboratoire RSA Security
- récompenses importantes offertes

Casser le chiffrement RSA

Les challenges RSA

- défis lancés par le laboratoire RSA Security
- récompenses importantes offertes

RSA-576	174 chiffres	réussi	2003
RSA-640	193 chiffres	réussi	2005
RSA-704	212 chiffres	non résolu – 30 000 dollars	
...	..	...	
RSA-2048	617 chiffres	non résolu – 200 000 dollars	

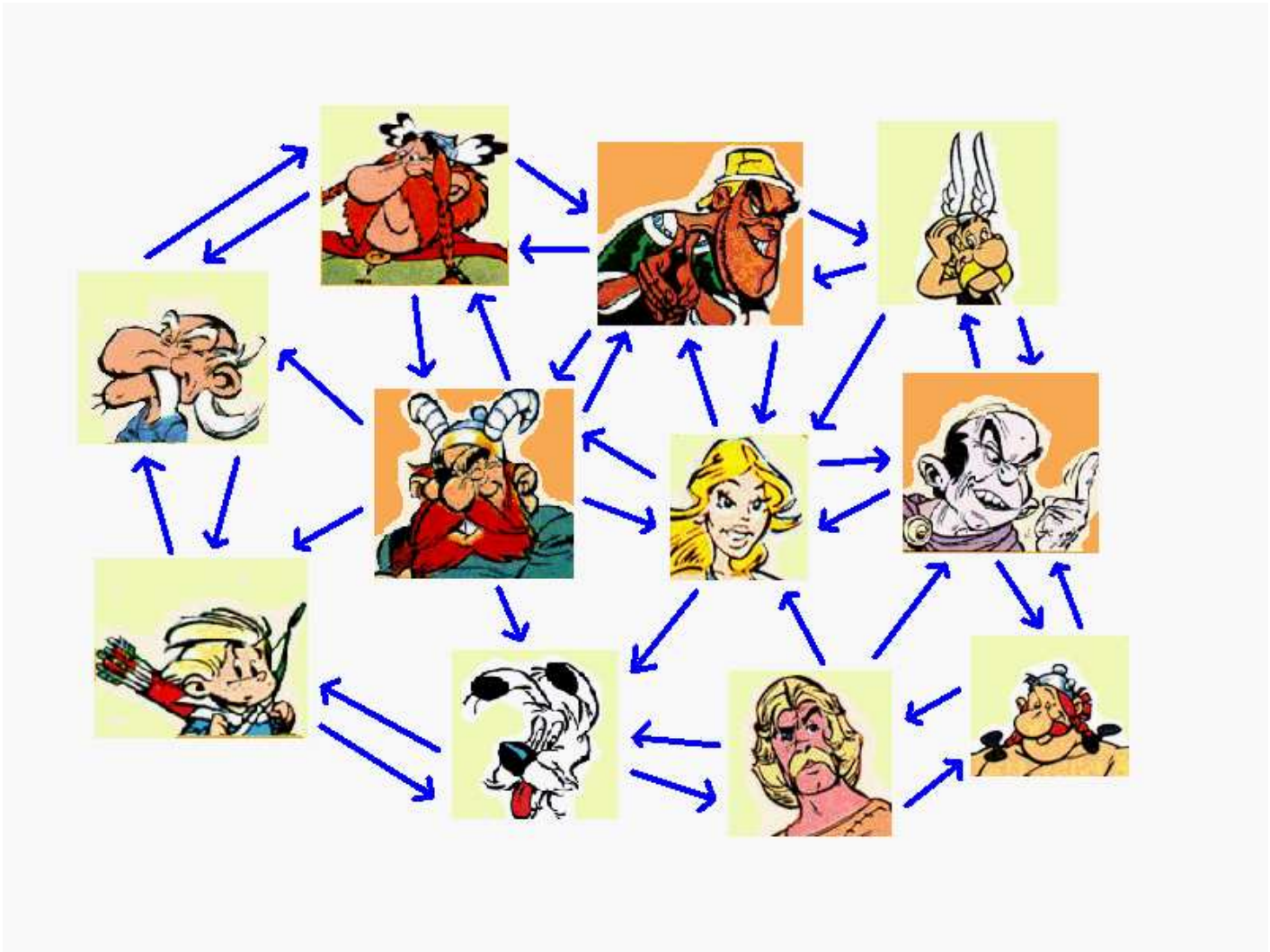
Casser le chiffrement RSA

Les challenges RSA

- défis lancés par le laboratoire RSA Security
- récompenses importantes offertes

RSA-576	174 chiffres	réussi	2003
RSA-640	193 chiffres	réussi	2005
RSA-704	212 chiffres	non résolu – 30 000 dollars	
...	..	...	
RSA-2048	617 chiffres	non résolu – 200 000 dollars	

$\longrightarrow$ Ces challenges ont été retirés en 2007 !



Chiffrer ne suffit pas toujours !

Attaque par rejeu de messages

virer 100 euros sur
le compte du marchand

Attaque par rejeu de messages

virer 100 euros sur
le compte du marchand

virer 100 euros sur
le compte du marchand

Attaque par rejeu de messages

virer 100 euros sur
le compte du marchand

virer 100 euros sur
le compte du marchand

virer 100 euros sur
le compte du marchand

⋮

virer 100 euros sur
le compte du marchand

Attaque par rejeu de messages

virer 100 euros sur
le compte du marchand

virer 100 euros sur
le compte du marchand

virer 100 euros sur
le compte du marchand

⋮

virer 100 euros sur
le compte du marchand

Exemple: attaque sur les décodeurs (bloquer l'ordre de désabonnement)

Applications

La carte bancaire

Le passeport électronique

Le vote électronique

Retour sur le protocole de carte bancaire

- Le client Cl insère sa carte C dans le terminal T.
- Le marchand saisit le montant M de la transaction.

- Le terminal vérifie qu'il s'agit d'une « vraie carte ».
- Le client entre son code.
  Si $M \geq$ €100, alors dans 20% des cas,
  - Le terminal contacte la banque B.
  - La banque donne (ou pas) son autorisation.

En détails (1/2)

4 acteurs: la Banque B , le Client Cl, la Carte C et le Terminal T

En détails (1/2)

4 acteurs: la Banque B , le Client Cl, la Carte C et le Terminal T

La **Banque possède**

- une clef privée – $\mathrm{priv}(B)$
- une clef publique – $\mathrm{pub}(B)$
- une clef symétrique secrète partagée avec la carte – K_{CB}

En détails (1/2)

4 acteurs: la Banque B , le Client Cl, la Carte C et le Terminal T

La **Banque possède**

- une clef privée – $\mathsf{priv}(B)$
- une clef publique – $\mathsf{pub}(B)$
- une clef symétrique secrète partagée avec la carte – K_{CB}

La **Carte** possède

- des données $Data$: nom du propriétaire, date d'expiration, ...
- la signature de ces données – $\{Data\}_{\mathsf{priv}(B)}$
- la clef K_{CB}, clef secrète partagée avec la banque.

En détails (1/2)

4 acteurs: la Banque B , le Client Cl, la Carte C et le Terminal T

La **Banque possède**

- une clef privée – $\mathsf{priv}(B)$
- une clef publique – $\mathsf{pub}(B)$
- une clef symétrique secrète partagée avec la carte – K_{CB}

La **Carte** possède

- des données $Data$: nom du propriétaire, date d'expiration, ...
- la signature de ces données – $\{Data\}_{\mathsf{priv}(B)}$
- la clef K_{CB}, clef secrète partagée avec la banque.

Le **Terminal possède**

- la clef publique de la banque – $\mathsf{pub}(B)$

En détails (2/2)

Le terminal T lit la carte C:

1. $C \rightarrow T : Data, \{Data\}_{\mathsf{priv}(B)}$

En détails (2/2)

Le terminal T lit la carte C:

1. $C \rightarrow T$: $Data, \{Data\}_{\mathsf{priv}(B)}$

Le terminal T demande le code:

2. $T \rightarrow CI$: $code?$
3. $CI \rightarrow C$: 1234
4. $C \rightarrow T$: code bon

En détails (2/2)

Le terminal T lit la carte C:

1. $C \rightarrow T$: $Data, \{Data\}_{\mathsf{priv}(B)}$

Le terminal T demande le code:

2. $T \rightarrow CI$: *code?*
3. $CI \rightarrow C$: 1234
4. $C \rightarrow T$: code bon

Le terminal T demande l'autorisation à la banque B:

5. $T \rightarrow B$: *autorisation?*
6. $B \rightarrow T$: 45289
7. $T \rightarrow C$: 45289
8. $C \rightarrow T$: $\{45289\}_{K_{CB}}$
9. $T \rightarrow B$: $\{45289\}_{K_{CB}}$
10. $B \rightarrow T$: *ok*

Attaques sur la carte bleue

Initialement la sécurité été assurée par :

- cartes difficilement réplicables,
- secret des clefs et du protocole.

Attaques sur la carte bleue

Initialement la sécurité été assurée par :

- cartes difficilement réplicables,
- secret des clefs et du protocole.

Mais il y a des failles !

- le chiffrement n'est pas sûr (les clefs de 320 bits ne sont plus sûres);
- on peut faire des fausses cartes.

$\rightarrow$ "YesCard" fabriquées par Serge Humpich (1997).

La « YesCard »: Comment ca marche ?

Faille logique

$$
\begin{aligned}
1.C &\rightarrow T &&: \text{Data}, \{\text{Data}\}_{\text{priv}(B)} \\
2.T &\rightarrow Cl &&: code? \\
3.Cl &\rightarrow C &&: 1234 \\
4.C &\rightarrow T &&: ok
\end{aligned}
$$

La « YesCard »: Comment ca marche ?

Faille logique

$$
\begin{aligned}
1.C &\rightarrow T &&: \text{Data}, \{\text{Data}\}_{\text{priv}(B)} \\
2.T &\rightarrow CI &&: code? \\
3.CI &\rightarrow C' &&: 2345 \\
4.C' &\rightarrow T &&: ok
\end{aligned}
$$

La « YesCard »: Comment ca marche ?

Faille logique

$$
\begin{aligned}
1.C &\rightarrow T &&: \text{Data}, \{\text{Data}\}_{\text{priv}(B)} \\
2.T &\rightarrow Cl &&: code? \\
3.Cl &\rightarrow C' &&: 2345 \\
4.C' &\rightarrow T &&: ok
\end{aligned}
$$

Remarque : il y a toujours quelqu'un à débiter.
$\rightarrow$ ajout d'un faux chiffrement sur une fausse carte (Serge Humpich).

La « YesCard »: Comment ca marche ?

Faille logique

$$
\begin{aligned}
1.C &\rightarrow T &&: \text{Data}, \{\text{Data}\}_{\text{priv}(B)} \\
2.T &\rightarrow CI &&: code? \\
3.CI &\rightarrow C' &&: 2345 \\
4.C' &\rightarrow T &&: ok
\end{aligned}
$$

Remarque : il y a toujours quelqu'un à débiter.
$\rightarrow$ ajout d'un faux chiffrement sur une fausse carte (Serge Humpich).

$$
\begin{aligned}
1.C' &\rightarrow T &&: \text{XXX}, \{\text{XXX}\}_{\text{priv}(B)} \\
2.T &\rightarrow CI &&: code? \\
3.CI &\rightarrow C' &&: 0000 \\
4.C' &\rightarrow T &&: ok
\end{aligned}
$$

Le passeport électronique

Passeport électronique

Un passeport électronique est un passeport contenant une puce RFID.

$\longrightarrow$ ils sont délivrés en France depuis l'été 2006.

Passeport électronique

Un passeport électronique est un passeport contenant une puce RFID.

$\longrightarrow$ ils sont délivrés en France depuis l'été 2006.

La puce RFID permet de stocker:

- les informations écrites sur le passeport,
- votre photo numérisée.

Passeport électronique

Un passeport électronique est un passeport contenant une puce RFID.

$\longrightarrow$ ils sont délivrés en France depuis l'été 2006.

La puce RFID permet de stocker:

- les informations écrites sur le passeport,
- votre photo numérisée.

Il est interrogeable à distance à l'insu de son propriétaire !

Passeport électronique — 1ère Génération

Aucun mécanisme de sécurité pour protéger les informations personnelles

Passeport électronique — 1ère Génération

Aucun mécanisme de sécurité pour protéger les informations personnelles

$\longrightarrow$ possibilité de récupérer la signature manuscrite du porteur en interrogeant le passeport à distance

Passeport électronique — 1ère Génération

Aucun mécanisme de sécurité pour protéger les informations personnelles

$\longrightarrow$ possibilité de récupérer la signature manuscrite du porteur en interrogeant le passeport à distance

"Faille" découverte sur les passeports belges

Passeport émis entre 2004 et 2006 en Belgique

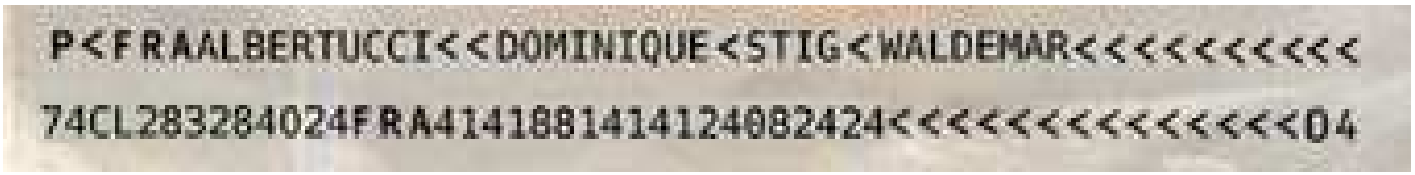
Passeport électronique — 2ème Génération

Passeport émis à partir de 2006 en France, en Belgique, . . .

Passeport électronique — 2ème Génération

Passeport émis à partir de 2006 en France, en Belgique, ...

$\longrightarrow$ mis en place d'un mécanisme (protocole BAC) qui permet de protéger nos informations personnelles



Avec ces deux lignes, on peut interroger la puce électronique.

Protocole BAC - objectif

Le Basic Access Control (BAC) protocole est un protocole d'établissement de clef qui doit assurer la protection de nos données personnelles ansi que la non traçabilité du passeport.

Protocole BAC - objectif

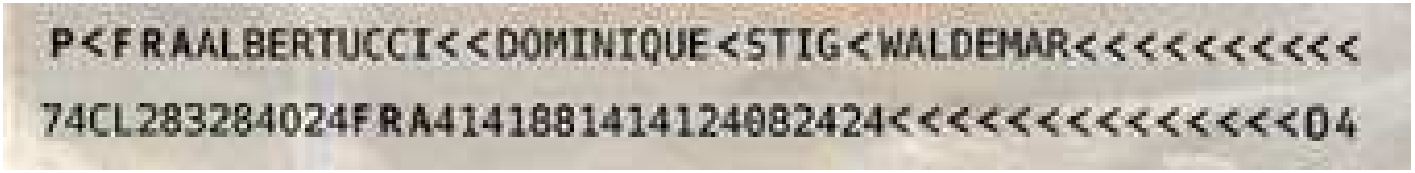
Le Basic Access Control (BAC) protocole est un protocole d'établissement de clef qui doit assurer la protection de nos données personnelles ansi que la non traçabilité du passeport.

ISO/IEC standard 15408

La non traçabilité a pour but d'assurer qu'un utilisateur peut utiliser plusieurs fois un service ou une ressource sans permettre à un tiers de faire un lien entre ces différentes utilisations.

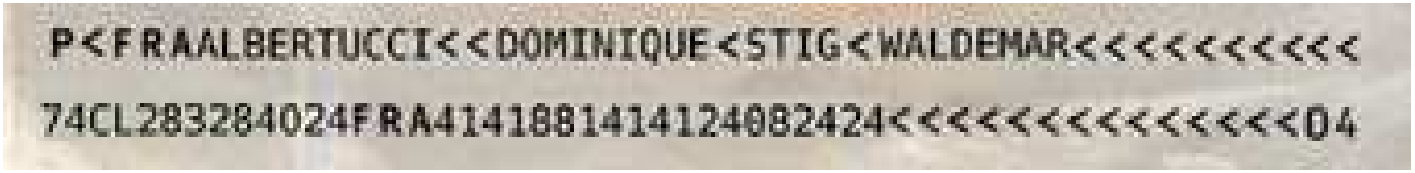
Protocole BAC - étape par étape

1. le lecteur dérive deux clefs K_E et K_M par lecture des lignes codées



Protocole BAC - étape par étape

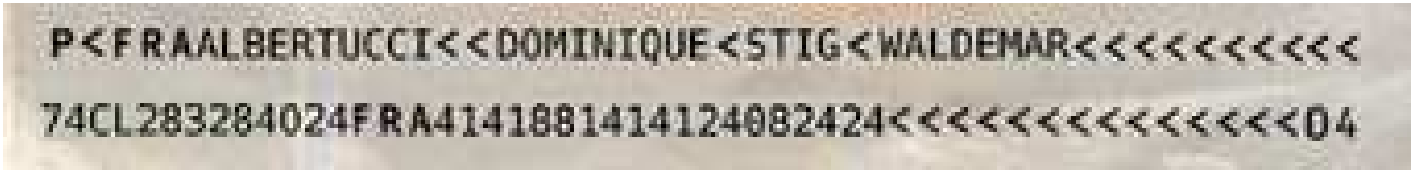
1. le lecteur dérive deux clefs K_E et K_M par lecture des lignes codées



2. Ensuite le passeport et le lecteur s'envoient des messages chiffrés pour établir une nouvelle clef K (utilisable qu'une seule fois);

Protocole BAC - étape par étape

1. le lecteur dérive deux clefs K_E et K_M par lecture des lignes codées



2. Ensuite le passeport et le lecteur s'envoient des messages chiffrés pour établir une nouvelle clef K (utilisable qu'une seule fois);

3. Ensuite, nos données confidentielles sont transmises chiffrées avec cette clef K.

Protocole BAC

Protocole BAC

Dans la description du protocole:

- il est mentionné que le passeport doit répondre à tous les messages qu'il reçoit (éventuellement avec un message d'erreur) mais ...

Protocole BAC

Dans la description du protocole:

- il est mentionné que le passeport doit répondre à tous les messages qu'il reçoit (éventuellement avec un message d'erreur) mais ...
- ... ces messages d'erreurs ne sont pas précisés.

Il en résulte une implémentation différentes selon les nations.

Attaque sur le passeport Français

Étape 1: l'attaquant intercepte les messages échangés au cours d'une exécution du protocole avec le passeport d'Alice:

$$\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E},\ \mathrm{MAC}_{K_M}(\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E})$$

Attaque sur le passeport Français

Étape 1: l'attaquant intercepte les messages échangés au cours d'une exécution du protocole avec le passeport d'Alice:

$$\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E},\ \mathrm{MAC}_{K_M}(\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E})$$

Étape 2: l'attaquant rejoue ce message ultérieurement, le passeport en présence répondra:

1. soit error 6300: "échec lors la vérification du MAC"
2. soit error 6A80: "échec lors de la vérification du nonce".

Attaque sur le passeport Français

Étape 1: l'attaquant intercepte les messages échangés au cours d'une exécution du protocole avec le passeport d'Alice:

$$\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E},\ \mathrm{MAC}_{K_M}(\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E})$$

Étape 2: l'attaquant rejoue ce message ultérieurement, le passeport en présence répondra:

1. soit error 6300: "échec lors la vérification du MAC"
2. soit error 6A80: "échec lors de la vérification du nonce".

$\longrightarrow$ le message error 6A80 indique qu'il s'agit du passeport Alice.

Attaque sur le passeport Français

Étape 1: l'attaquant intercepte les messages échangés au cours d'une exécution du protocole avec le passeport d'Alice:

$$\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E},\ \mathrm{MAC}_{K_M}(\{N_R, N_P, K_R\}_{K_E})$$

Étape 2: l'attaquant rejoue ce message ultérieurement, le passeport en présence répondra:

1. soit error 6300: "échec lors la vérification du MAC"
2. soit error 6A80: "échec lors de la vérification du nonce".

$\longrightarrow$ le message error 6A80 indique qu'il s'agit du passeport Alice.

Attaque découverte en 2010 par T. Chothia et V. Smirnov

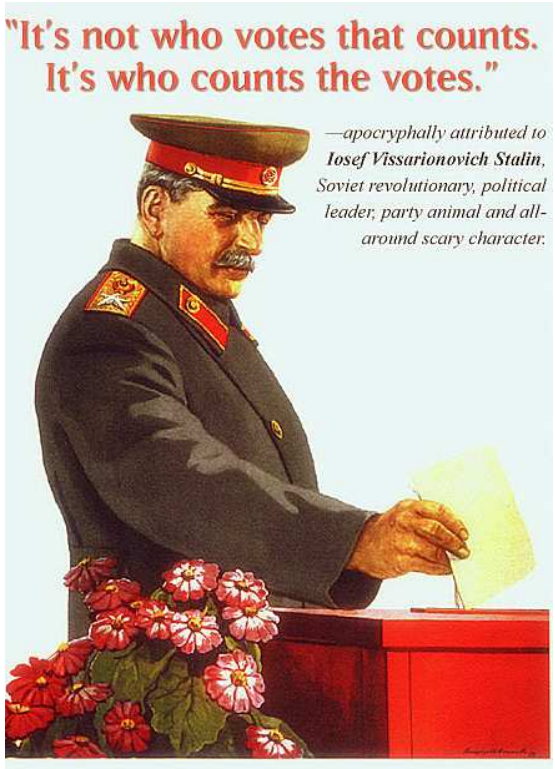
Vote électronique

Vote électronique

La démocratie est-elle en péril ?

Avantages:

- pratique: différents types de scrutins, possibilité de voter de chez soi, ...
- décompte efficace des bulletins.

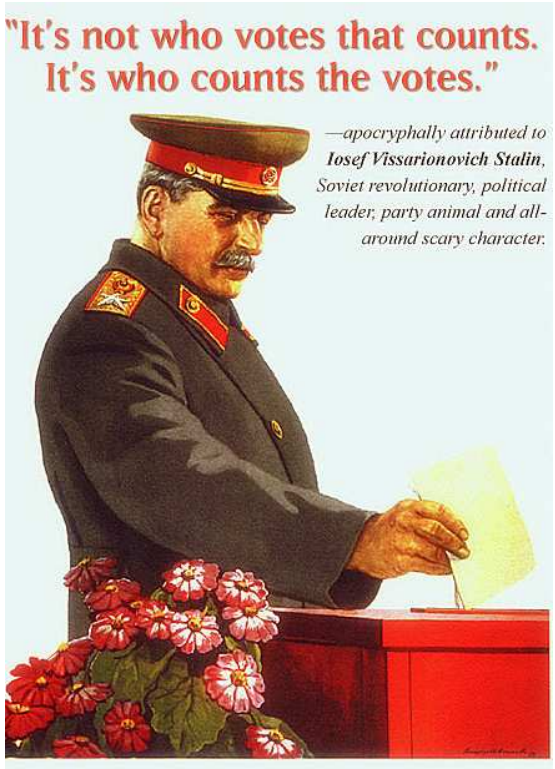


Vote électronique

La démocratie est-elle en péril ?

Avantages:

- pratique: différents types de scrutins, possibilité de voter de chez soi, ...
- décompte efficace des bulletins.



... mais il est souvent **opaque** et **invérifiable** !

Deux grandes familles

Machines à voter

- utilisation des bureaux de vote et des isoloirs;
- mécanisme d'authentification externe (*e.g.* carte d'identité)

Deux grandes familles

Machines à voter

- utilisation des bureaux de vote et des isoloirs;
- mécanisme d'authentification externe (*e.g.* carte d'identité)

$\longrightarrow$ machines NEDAP utilisées en France lors de scrutins nationaux (*e.g.* élection présidentielle de 2007)

Deux grandes familles

Machines à voter

- utilisation des bureaux de vote et des isoloirs;
- mécanisme d'authentification externe (*e.g.* carte d'identité)

$\longrightarrow$ machines NEDAP utilisées en France lors de scrutins nationaux (*e.g.* élection présidentielle de 2007)

Vote par Internet

- possibilité de voter de chez soi avec son ordinateur personnel;

Deux grandes familles

Machines à voter

- utilisation des bureaux de vote et des isoloirs;
- mécanisme d'authentification externe (*e.g.* carte d'identité)

$\longrightarrow$ machines NEDAP utilisées en France lors de scrutins nationaux (*e.g.* élection présidentielle de 2007)

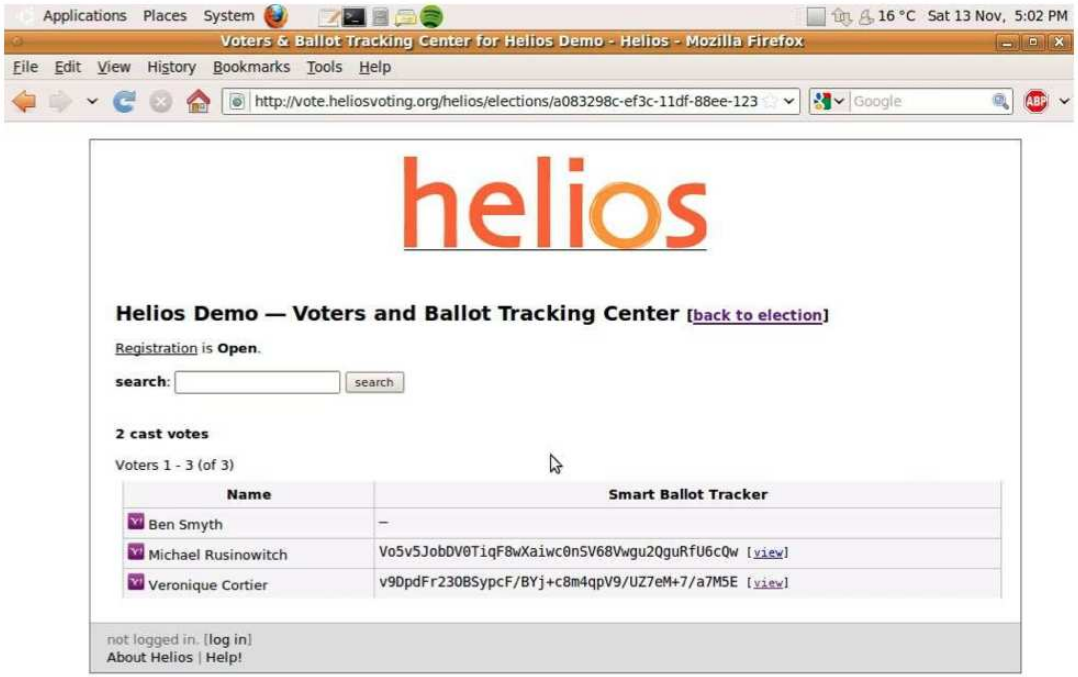
Vote par Internet

- possibilité de voter de chez soi avec son ordinateur personnel;

$\longrightarrow$ utilisé en Estonie (législatives 2011), en Suisse (depuis 2004), en France (*e.g.* élections prud'homales)

Helios (vote par Internet)

$\longrightarrow$ développé par Ben Adida *et al.*



$\longrightarrow$ utilisé lors de plusieurs élections: à l'UCL, à l'Université de Princeton, ...

Qu'est-ce qu'un bon protocole de vote ?

Vérifiabilité individuelle

Équité

Absence de reçu

Résistance à la coercition

Vérifiabilité universelle

Éligibilité

Anonymat

Qu'est-ce qu'un bon protocole de vote ?

Vérifiabilité individuelle

Équité

Absence de reçu

Résistance à la coercition

Vérifiabilité universelle

Éligibilité

Anonymat

Les propriétés de sécurité à satisfaire sont:

- très nombreuses;
- à première vue contradictoires.

Qu'est-ce qu'un bon protocole de vote ?

Vérifiabilité individuelle

Équité

Absence de reçu

Résistance à la coercition

Vérifiabilité universelle

Éligibilité

Anonymat

Les propriétés de sécurité à satisfaire sont:

- très nombreuses;
- à première vue contradictoires.

$\longrightarrow$ protocoles souvent complexes, utilisant des mécanismes cryptographiques « exotiques ».

Protocole Helios (version simplifiée)

Phase de vote: (valeur 0 ou 1)

Tableau d'affichage	
Alice	$\{v_A\}_{\mathsf{pub}(S)}$
Bob	$\{v_B\}_{\mathsf{pub}(S)}$
Chris	$\{v_C\}_{\mathsf{pub}(S)}$

Protocole Helios (version simplifiée)

Phase de vote: (valeur 0 ou 1)

Tableau d'affichage	
Alice	$\{v_A\}_{\mathsf{pub}(S)}$
Bob	$\{v_B\}_{\mathsf{pub}(S)}$
Chris	$\{v_C\}_{\mathsf{pub}(S)}$

$\{v_D\}_{\mathsf{pub}(S)}$ ←

Protocole Helios (version simplifiée)

Phase de vote: (valeur 0 ou 1)

Tableau d'affichage	
Alice	$\{v_A\}_{\mathsf{pub}(S)}$
Bob	$\{v_B\}_{\mathsf{pub}(S)}$
Chris	$\{v_C\}_{\mathsf{pub}(S)}$
David	$\{v_D\}_{\mathsf{pub}(S)}$

Protocole Helios (version simplifiée)

Phase de vote: (valeur 0 ou 1)

Tableau d'affichage	
Alice	$\{v_A\}_{\text{pub}(S)}$
Bob	$\{v_B\}_{\text{pub}(S)}$
Chris	$\{v_C\}_{\text{pub}(S)}$
David	$\{v_D\}_{\text{pub}(S)}$

Phase de comptage: utilisation du chiffrement homomorphique

$$\{v_A\}_{\text{pub}(S)} \times \{v_B\}_{\text{pub}(S)} \times \ldots = \{v_A + v_B + \ldots\}_{\text{pub}(S)}$$

$\longrightarrow$ Ainsi seul le résultat final sera déchiffré.

Protocole Helios (version simplifiée)

Phase de vote: (valeur 0 ou 1)

Tableau d'affichage	
Alice	$\{v_A\}_{\text{pub}(S)}$
Bob	$\{v_B\}_{\text{pub}(S)}$
Chris	$\{v_C\}_{\text{pub}(S)}$
David	$\{v_D\}_{\text{pub}(S)}$

Phase de comptage: utilisation du chiffrement homomorphique

$$\{v_A\}_{\text{pub}(S)} \times \{v_B\}_{\text{pub}(S)} \times \ldots = \{v_A + v_B + \ldots\}_{\text{pub}(S)}$$

$\longrightarrow$ Ainsi seul le résultat final sera déchiffré.

Un votant malhonnête pourrait tricher !

Protocole Helios (version simplifiée)

Phase de vote: (valeur 0 ou 1)

Tableau d'affichage	
Alice	$\{v_A\}_{\text{pub}(S)}$
Bob	$\{v_B\}_{\text{pub}(S)}$
Chris	$\{v_C\}_{\text{pub}(S)}$
David	$\{v_D\}_{\text{pub}(S)}$

Phase de comptage: utilisation du chiffrement homomorphique

$$\{v_A\}_{\text{pub}(S)} \times \{v_B\}_{\text{pub}(S)} \times \ldots = \{v_A + v_B + \ldots\}_{\text{pub}(S)}$$

$\longrightarrow$ Ainsi seul le résultat final sera déchiffré.

Un votant malhonnête pourrait tricher !

$\{v_D\}_{\text{pub}(S)}$ " + " preuve que v_D est égal à 0 ou 1

Protocole Helios

Vérifiabilité individuelle et universelle

Helios satisfait a priori les différentes formes de vérifiabilité.

Protocole Helios

Vérifiabilité individuelle et universelle

Helios satisfait a priori les différentes formes de vérifiabilité.

Anonymat, sans reçu, et résistance à la coercition

- Helios ne résiste pas aux formes de coercition les plus fortes
  $\longrightarrow$ il est possible d'obtenir un reçu de son vote

Protocole Helios

Vérifiabilité individuelle et universelle

Helios satisfait a priori les différentes formes de vérifiabilité.

Anonymat, sans reçu, et résistance à la coercition

- Helios ne résiste pas aux formes de coercition les plus fortes
  $\longrightarrow$ il est possible d'obtenir un reçu de son vote
- **Helios ne satisfait même pas l'anonymat !**
  $\longrightarrow$ il est possible de rejouer un message est de voter comme une autre votant de son choix (sans pour autant connaître la valeur de son vote)

Protocole Helios

Vérifiabilité individuelle et universelle

Helios satisfait a priori les différentes formes de vérifiabilité.

Anonymat, sans reçu, et résistance à la coercition

- Helios ne résiste pas aux formes de coercition les plus fortes
  $\longrightarrow$ il est possible d'obtenir un reçu de son vote
- **Helios ne satisfait même pas l'anonymat !**
  $\longrightarrow$ il est possible de rejouer un message est de voter comme une autre votant de son choix (sans pour autant connaître la valeur de son vote)

Attaque découverte en 2011 par B. Smyth et V. Cortier

Comment vérifier ces protocoles ?

Les mathématiques et l'informatique à la rescousse !

Comment vérifier ces protocoles ?

Les mathématiques et l'informatique à la rescousse !

Notre but:

1. faire des preuves mathématiques rigoureuses,
2. d'une façon automatique.

« Construire une machine à détecter les bugs »

Comment vérifier ces protocoles ?

Les mathématiques et l'informatique à la rescousse !

Notre but:

1. faire des preuves mathématiques rigoureuses,
2. d'une façon automatique.

« Construire une machine à détecter les bugs »

1936: une telle machine n'existe pas (Alan Turing)

... même dans le cas particulier des protocoles cryptographiques.

Mais alors, que faisons nous ?

Le problème n'a pas de solution ....

Mais alors, que faisons nous ?

Le problème n'a pas de solution ....

mais seulement dans le cas général

Mais alors, que faisons nous ?

Le problème n'a pas de solution ....

mais seulement dans le cas général

Différentes pistes:

- résoudre le problème dans de nombreux cas intéressants,

Mais alors, que faisons nous ?

Le problème n'a pas de solution ....

mais seulement dans le cas général

Différentes pistes:

- résoudre le problème dans de nombreux cas intéressants,
- proposer des procédures approchées,

  Exemple: si le vérificateur répond « oui » alors le logiciel est sûr, sinon on ne peut rien dire

La logique (du premier ordre) à la rescousse !

Un peu de vocabulaire:

- les termes représentent les objets, e.g. $\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}$;
- les prédicats représentent les relations entre ces objets, e.g. $\mathcal{I}(\_)$;
- les atomes représentent les faits qui sont vrais, e.g. $\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$.

La logique (du premier ordre) à la rescousse !

Un peu de vocabulaire:

- les termes représentent les objets, e.g. $\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}$;
- les prédicats représentent les relations entre ces objets, e.g. $\mathcal{I}(\_)$;
- les atomes représentent les faits qui sont vrais, e.g. $\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$.

Clauses de Horn:

$$\forall x_1 \cdot \ldots \forall x_n \cdot \; A_1; \ldots A_n \Rightarrow B$$

La logique (du premier ordre) à la rescousse !

Un peu de vocabulaire:

- les termes représentent les objets, e.g. $\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}$;
- les prédicats représentent les relations entre ces objets, e.g. $\mathcal{I}(\_)$;
- les atomes représentent les faits qui sont vrais, e.g. $\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$.

Clauses de Horn:

$$\forall x_1 \cdot \ldots \forall x_n \cdot \; A_1; \ldots A_n \Rightarrow B$$

Exemple (clauses de Horn pour l'attaquant $\mathcal{C}_A$):

$$\forall x \cdot \forall y \cdot \quad \mathcal{I}(x);\, \mathcal{I}(\mathsf{pub}(y)) \quad \Rightarrow \quad \mathcal{I}(\{x\}_{\mathsf{pub}(y)})$$

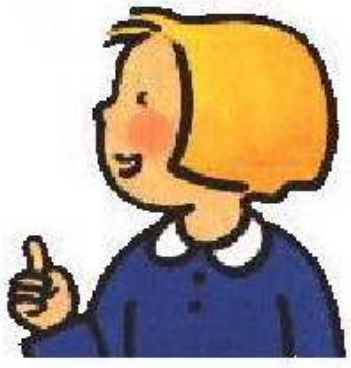
$$\forall x \cdot \forall y \cdot \quad \mathcal{I}(\{x\}_{\mathsf{pub}(y)});\, \mathcal{I}(y) \quad \Rightarrow \quad \mathcal{I}(x)$$

Un exemple pour illustrer

$\xleftarrow{\{secret\}_{pub(A)}}$

$\xrightarrow{\{\{secret\}_{pub(A)}\}_{pub(B)}}$

$\xleftarrow{\{secret\}_{pub(B)}}$



$\longrightarrow \{\{secret\}_{pub(A)}\}_{pub(B)} = \{\{secret\}_{pub(B)}\}_{pub(A)}$.

Un exemple pour illustrer

$\xleftarrow{\{secret\}_{pub(A)}}$

$\xrightarrow{\{\{secret\}_{pub(A)}\}_{pub(B)}}$

$\xleftarrow{\{secret\}_{pub(B)}}$

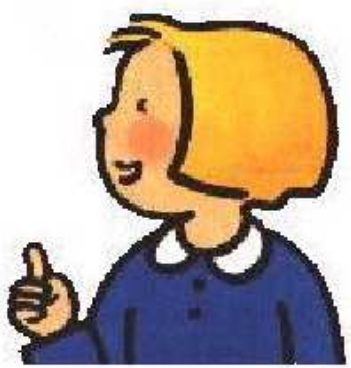
Ce protocole ne marche pas! (problème d'authentification)

Un exemple pour illustrer

$\leftarrow \{secret\}_{pub(A)}$

$\{\{secret\}_{pub(A)}\}_{pub(B)} \rightarrow$

$\leftarrow \{secret\}_{pub(B)}$

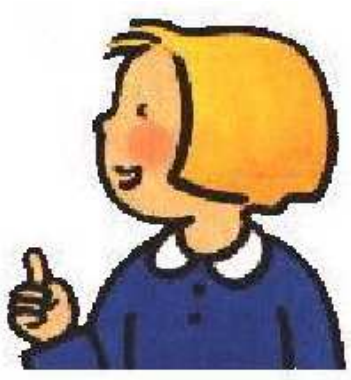


Ce protocole ne marche pas! (problème d'authentification)

$\leftarrow \{secret\}_{pub(A)}$

$\{\{secret\}_{pub(A)}\}_{pub(I)} \rightarrow$

$\leftarrow \{secret\}_{pub(I)}$



Clauses de Horn pour le protocole

Protocole

$$
\begin{array}{lcl}
A & \rightarrow & B : \{s\}_{\mathsf{pub}(A)} \\
B & \rightarrow & A : \{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)} \\
A & \rightarrow & B : \{s\}_{\mathsf{pub}(B)}
\end{array}
$$

Clauses de Horn $\mathcal{C}_P$

$$
\begin{array}{rcl}
 & \Rightarrow & \mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}) \\
\forall x \cdot \mathcal{I}(x) & \Rightarrow & \mathcal{I}(\{x\}_{\mathsf{pub}(B)}) \\
\forall x \cdot \mathcal{I}(\{x\}_{\mathsf{pub}(A)}) & \Rightarrow & \mathcal{I}(x)
\end{array}
$$

Clauses de Horn pour le protocole

Protocole

$$
\begin{array}{lcl}
A & \rightarrow & B : \{s\}_{\mathrm{pub}(A)} \\
B & \rightarrow & A : \{\{s\}_{\mathrm{pub}(A)}\}_{\mathrm{pub}(B)} \\
A & \rightarrow & B : \{s\}_{\mathrm{pub}(B)}
\end{array}
$$

Clauses de Horn $\mathcal{C}_P$

$$
\begin{array}{rcl}
 & \Rightarrow & \mathcal{I}(\{s\}_{\mathrm{pub}(A)}) \\
\forall x \cdot \mathcal{I}(x) & \Rightarrow & \mathcal{I}(\{x\}_{\mathrm{pub}(B)}) \\
\forall x \cdot \mathcal{I}(\{x\}_{\mathrm{pub}(A)}) & \Rightarrow & \mathcal{I}(x)
\end{array}
$$

Résultat

Le protocole est sûr si, et seulement si, l'ensemble des formules codant:

- la capacité de déduction de l'attaquant;
- les règles du protocole; et
- la propriété de sécurité, e.g. $\neg\mathcal{I}(s)$

est satisfaisable.

$\longrightarrow$ Est-ce que $\mathcal{C}_P \cup \mathcal{C}_A \cup \{\neg\mathcal{I}(s)\}$ est satisfaisable?

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$;

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$; $\mathcal{I}(\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$;

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$; $\mathcal{I}(\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\mathcal{I}(\{\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$;

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$; $\mathcal{I}(\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\mathcal{I}(\{\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\ldots$

... mais la saturation ne termine pas (même sur des exemples très simples)

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$; $\mathcal{I}(\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\mathcal{I}(\{\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\ldots$

... mais la saturation ne termine pas (même sur des exemples très simples)

Résolution ordonnée avec sélection

$\longrightarrow$ choisir « soigneusement » le litéral sur lequel on va faire la résolution

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$; $\mathcal{I}(\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\mathcal{I}(\{\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\ldots$

... mais la saturation ne termine pas (même sur des exemples très simples)

Résolution ordonnée avec sélection

$\longrightarrow$ choisir « soigneusement » le litéral sur lequel on va faire la résolution

On ne peut toujours pas assurer la terminaison en général mais:

- ça termine souvent en pratique;
- on peut même garantir la terminaison pour des classes intéressantes.

Comment tester la satisfaisabilité ?

Résolution

$\longrightarrow$ saturer l'ensemble de clauses avec toutes ses conséquences logiques

$\mathcal{I}(\{s\}_{\mathsf{pub}(A)})$; $\mathcal{I}(\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\mathcal{I}(\{\{\{s\}_{\mathsf{pub}(A)}\}_{\mathsf{pub}(B)}\}_{\mathsf{pub}(B)})$; $\ldots$

... mais la saturation ne termine pas (même sur des exemples très simples)

Résolution ordonnée avec sélection

$\longrightarrow$ choisir « soigneusement » le litéral sur lequel on va faire la résolution

On ne peut toujours pas assurer la terminaison en général mais:

- ça termine souvent en pratique;
- on peut même garantir la terminaison pour des classes intéressantes.

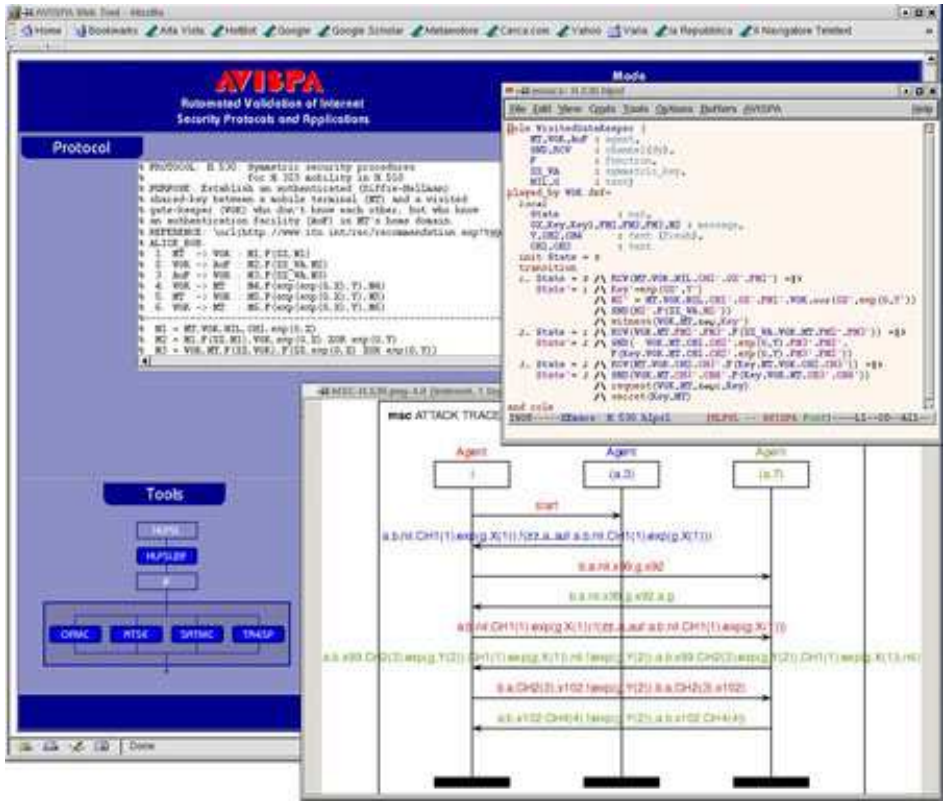
Cette technique est implémentée dans l'outil de vérification ProVerif

`http://www.proverif.ens.fr/`

$\longrightarrow$ outil développé par Bruno Blanchet

Outil de vérification AVISPA

Outil disponible en ligne: `http://www.avispa-project.org/`



$\longrightarrow$ Projet Européen (France, Italie, Allemagne, Suisse)

Conclusion

Les méthodes formelles permettent une bonne analyse des protocoles cryptographiques.

- découverte de failles à l'aide d'outil de vérification;
- des preuves formelles de sécurité peuvent être obtenues automatiquement (sans intervention humaine).

Conclusion

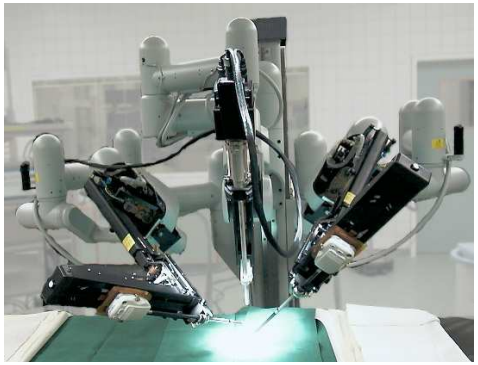
Les méthodes formelles permettent une bonne analyse des protocoles cryptographiques.

- découverte de failles à l'aide d'outil de vérification;
- des preuves formelles de sécurité peuvent être obtenues automatiquement (sans intervention humaine).

Il reste cependant beaucoup à faire:

- savoir analyser différentes propriétés de sécurité
  $\longrightarrow$ l'anonymat sous toutes ses formes!
- prendre en compte les propriétés mathématiques du chiffrement (e.g. chiffrement homomorphique), hachage, signature, ...
- réaliser ses analyses formelles dans des modèles plus réalistes.

Il reste beaucoup à faire (la suite)

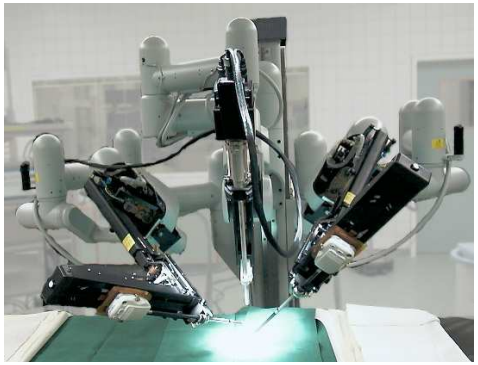


Les logiciels sont en perpétuelle évolution ...

- en vue de leur amélioration,
- pour développer de nouvelles applications
  $\longrightarrow$ vote électronique, robot en chirurgie, ...

... et sont de plus en plus complexes.

Il reste beaucoup à faire (la suite)



Les logiciels sont en perpétuelle évolution ...

- en vue de leur amélioration,
- pour développer de nouvelles applications
  $\longrightarrow$ vote électronique, robot en chirurgie, ...

... et sont de plus en plus complexes.

L'informatique est une **discipline** très vaste et en plein essor.

- informatique de la vérification,
- bioinformatique,
- exploration de données, ...