
Introduction à la Sécurité des Réseaux

<http://www.enst.fr/~urien/cours.html>



"On the Internet, nobody knows you're a dog."



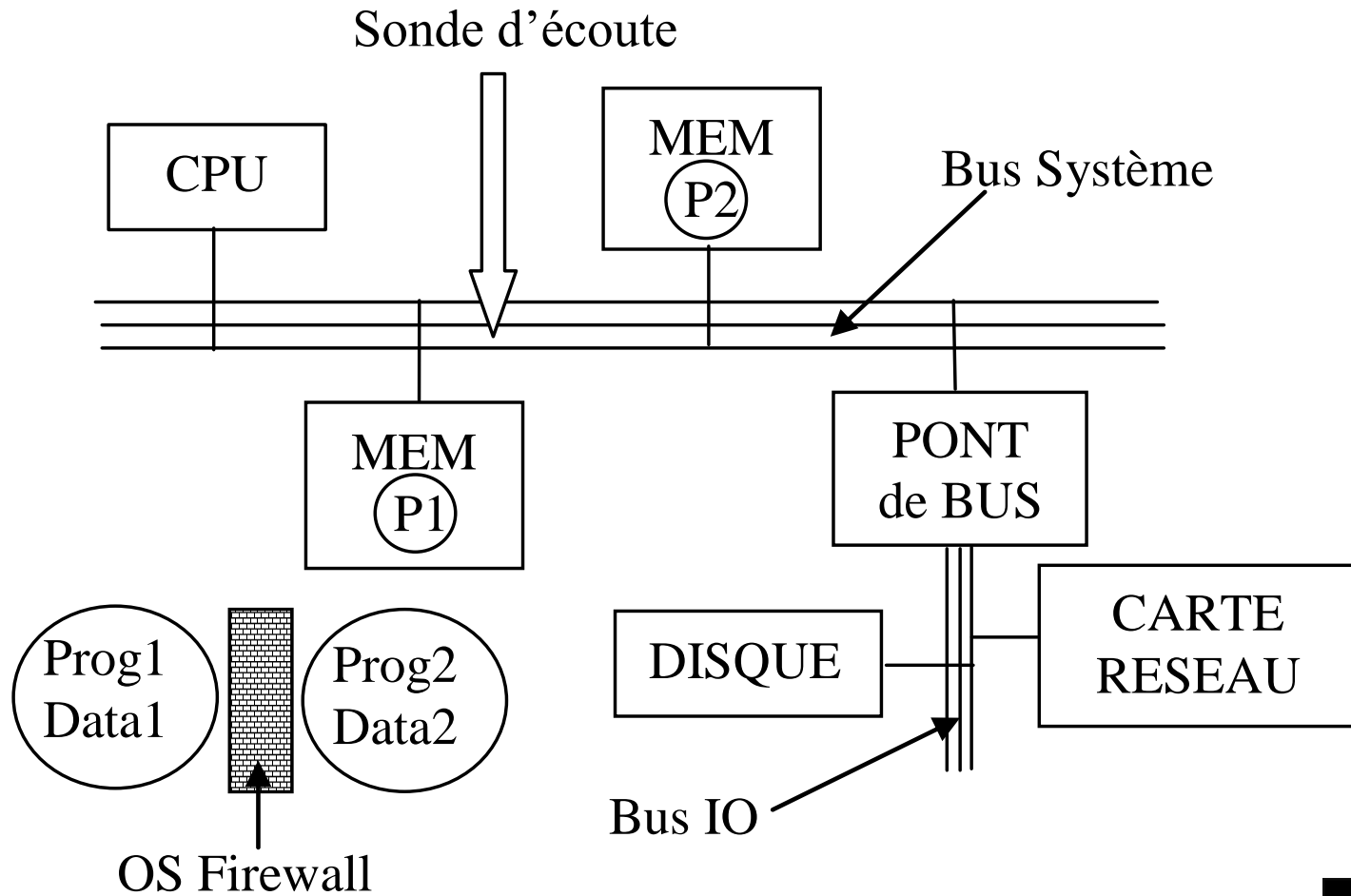
Un rapide historique



Applications distribuées

- ✚ Une application distribuée est un ensemble d'entités logicielles, logiquement autonomes, qui produisent, consomment et échangent des informations
 - $OUT_i = PROG(IN_i)$
- ✚ Dans un premier temps les composants logiciels des applications étaient logés dans un même système informatique, constituant de fait leur média de communication (parfois dénommé *gluware*).
 - Le bus système permet le transfert des informations stockées en mémoire, les modules logiciels sont réalisés par des processus gérés par le système d'exploitation.
 - La sécurité est uniquement dépendante des caractéristiques du système d'exploitation, par exemple en terme de gestion des droits utilisateurs, ou d'isolement des processus.

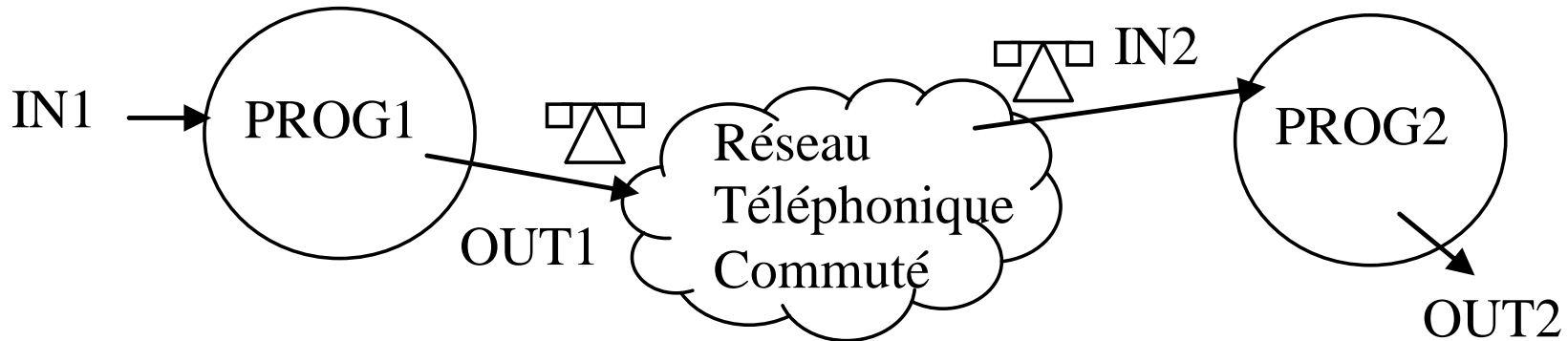




L'âge des MODEMS



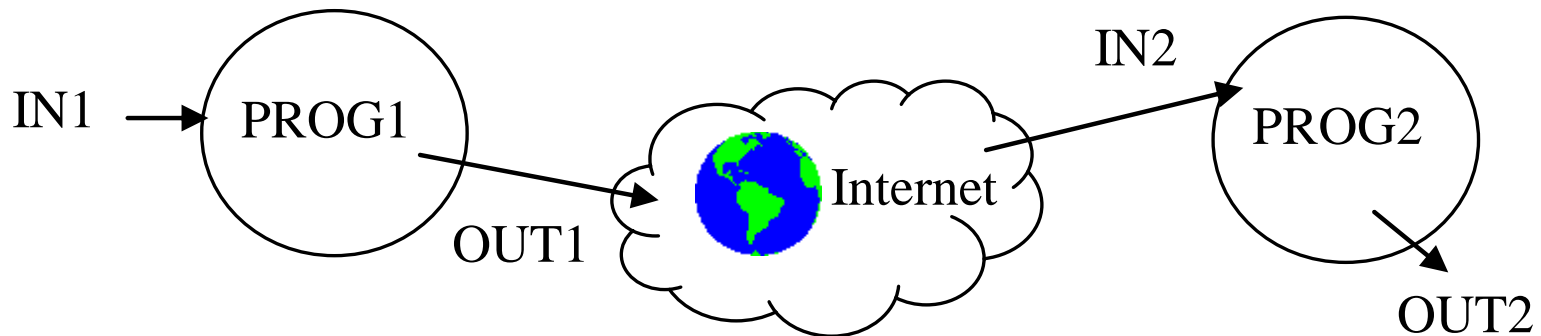
- ✚ Dans une deuxième période l'application distribuée est répartie entre plusieurs systèmes informatiques reliés entre eux par des liens de communications supposés sûres (c'est à dire qu'il est difficile d'enregistrer ou de modifier l'information transmise) tels que modems ou liaisons spécialisées (X25, RNIS ...).
- ✚ Nous remarquerons à ce propos qu'il est possible de sécuriser une liaison de type point à point par un dispositif matériel de chiffrement.



Internet Protocol

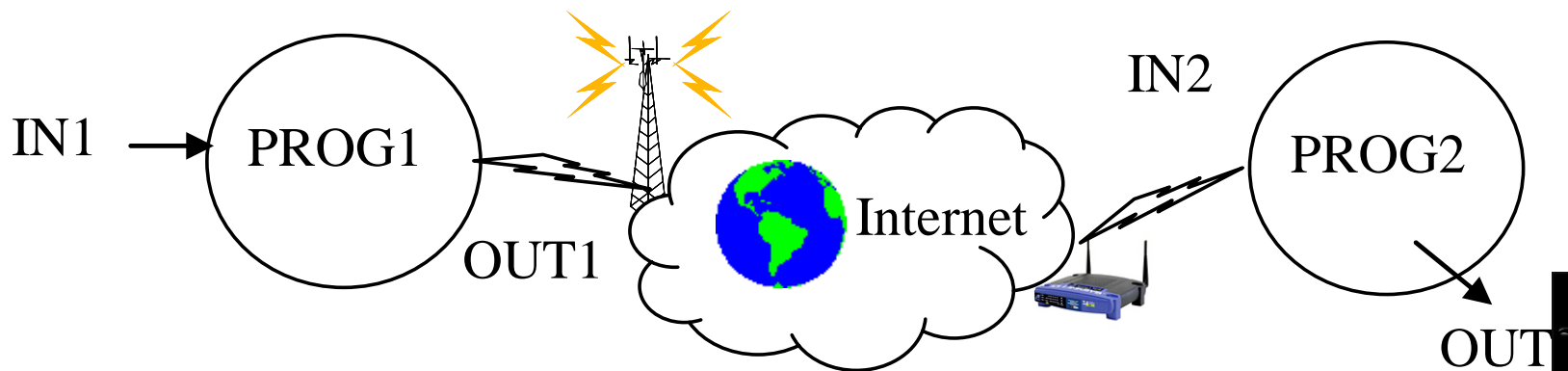


- ✚ Enfin l'émergence de la toile d'araignée mondiale a permis de concevoir des systèmes distribués à l'échelle planétaire, les composants logiciels sont répartis sur des systèmes informatiques hétéroclites, le réseau n'est pas sûr, le nombre d'utilisateurs est important.
- ✚ La sécurité devient un paramètre critique et tente de concilier des contraintes à priori antinomiques telles que, nécessité économique d'utiliser Internet, et impérative résistance à la piraterie informatique ou à l'espionnage.



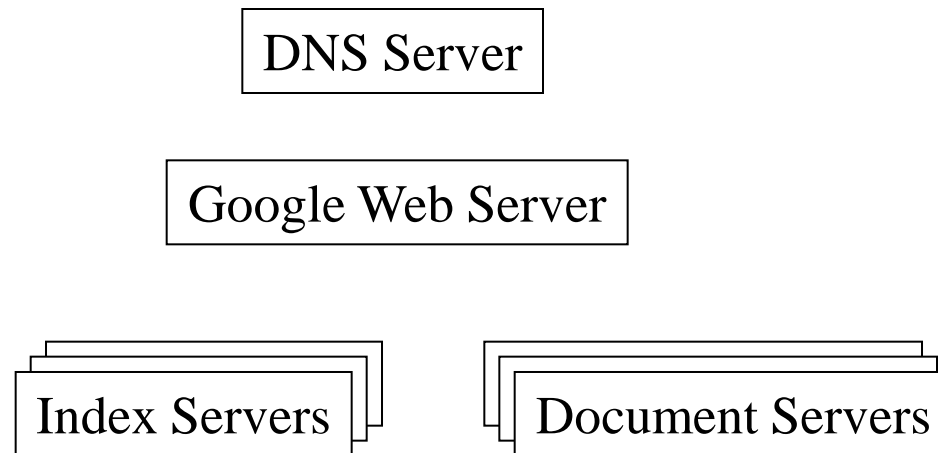
Ubiquitous Networks

- ✚ La dernière révolution des communications s'appuie sur les technologies de réseaux IP sans fil, tels que Wi-Fi ou WiMAX.
- ✚ Les liens filaires symboles d'une connectivité volontaire et contrôlée s'estompent, l'infrastructure du réseau devient diffuse et invisible. Un nouveau besoin de sécurité s'affirme, le contrôle des accès réseaux.



Petite Histoire de GOOGLE

Une société fondée en 1998 par Larry Page
et Sergev Brin



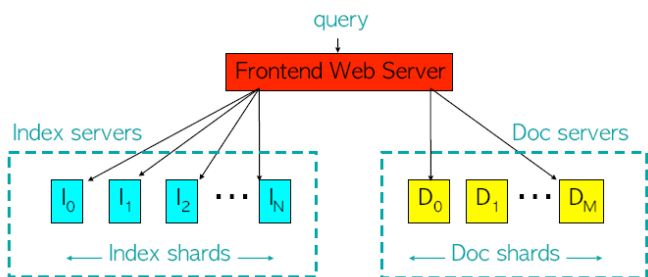
Vers le Data Center...

- 359 racks
- 31,654 machines
- 63,184 CPUs
- 126,368 Ghz of processing power
- 63,184 Gb of RAM
- 2,527 Tb of Hard Drive space

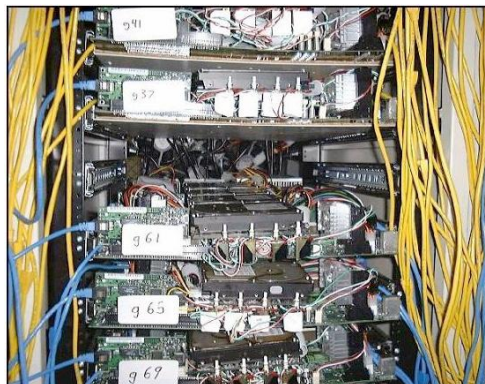
1792 megabytes of memory
 366 gigabytes of disk storage
 2933 megahertz in 10 CPUs



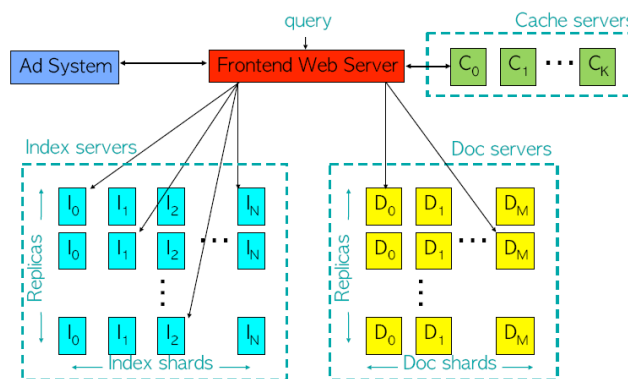
GOOGLE CIRCA 1999



1997



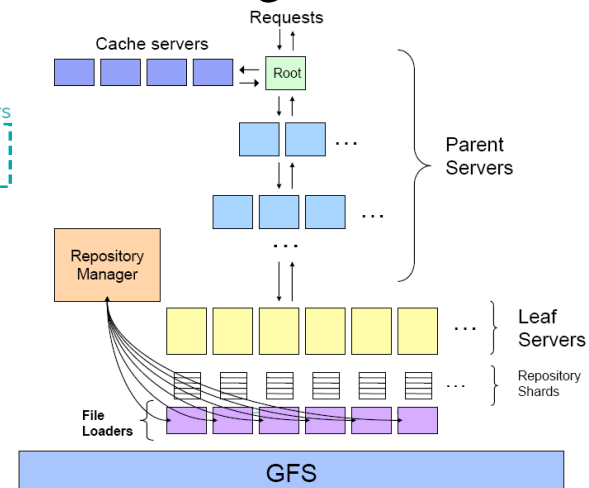
CorkBoard



1999



Google Cluster



2004



2006, The Dalles Data Center

The Dalles, Oregon Data Center - Hello City of The Dalles! - Windows Internet Explorer

http://www.google.com/datacenter/thedalles/index.html

Google The Dalles, Oregon Data Center **Au moins 12 data center de grande capacité**

Home **Hello City of The Dalles!**

[Frequently Asked Questions](#)

[Data Center Details](#)

[Opportunities and Contacts](#)

[Community Outreach](#)

Google is very happy to be located in The Dalles, Oregon.

We opened our data center here in 2006 and today we're fully operational with approximately 200 people on site, ranging from technology assistants to experienced data center managers. We have had an excellent experience in The Dalles as we've built out this **\$600 million** investment, and we look forward to being a part of the Columbia Gorge community for many years to come.

We're eager to share more information with you about what we're doing in the area. On this site, you'll find information about:

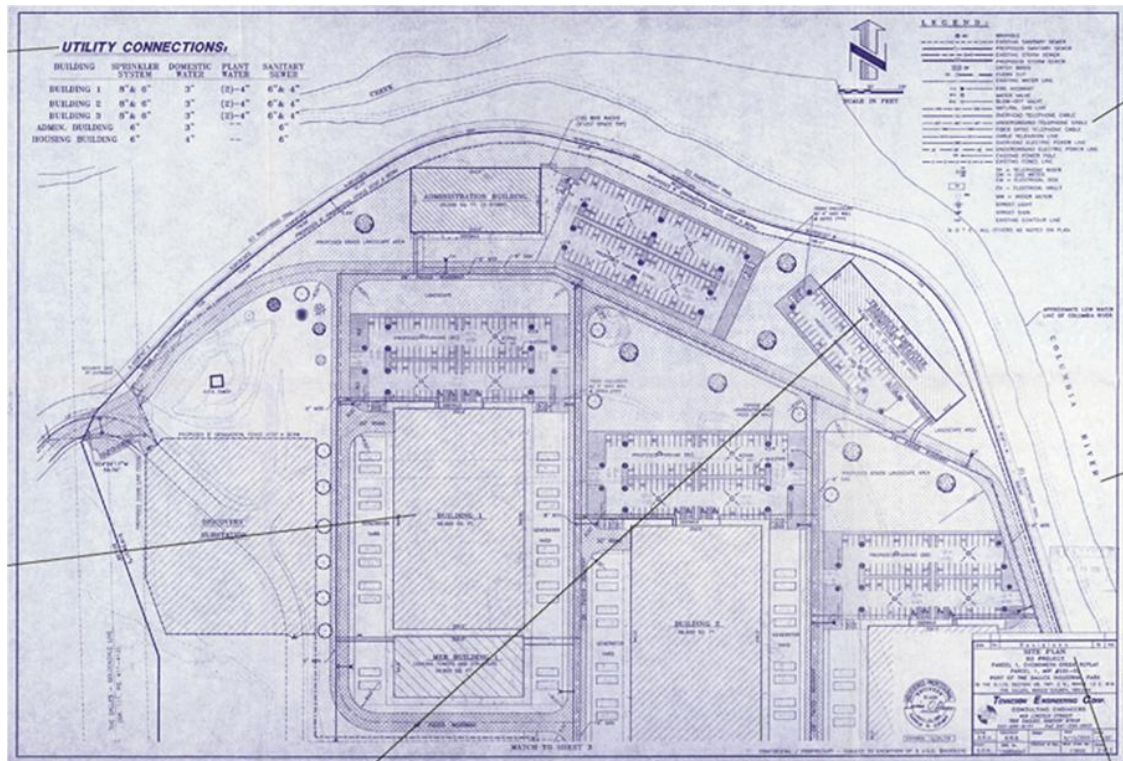
- what exactly a data center is
- the kinds of jobs that are available
- what Google does
- how to contact us
- our community outreach program

Google's data center in the City of The Dalles is a part of the Columbia Gorge community.

GOOGLE
data center
(2008)

Internet | Mode protégé : activé

The Dalles Data Center

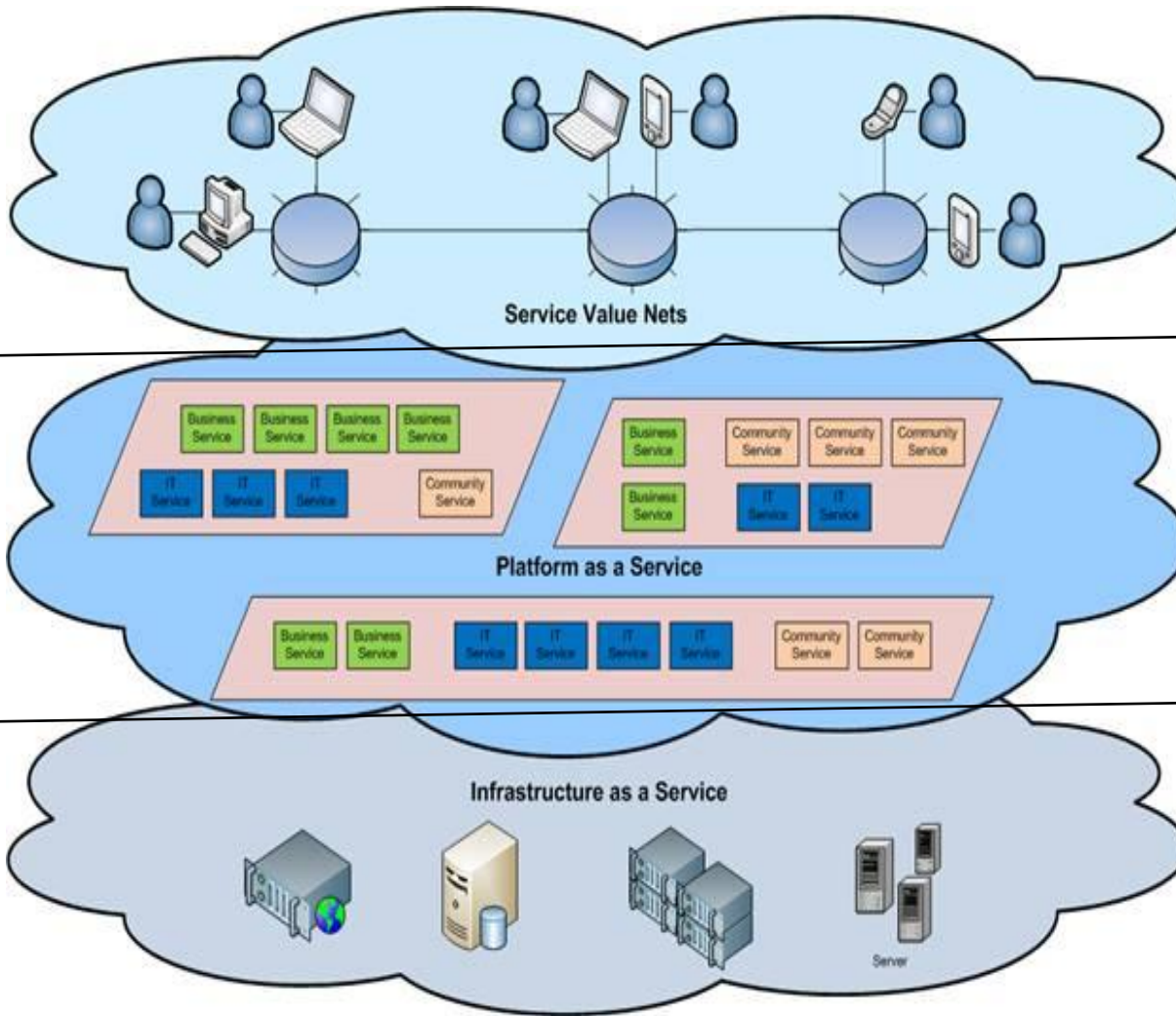


- 3 bâtiments de 6400m² (2 construits)
- 1 million de serveurs
- 2⁵⁰ octets (penta octet, 1024 To, 1 million de Go)
- 103 MW (un réacteur nucléaire produit entre 1000 et 1500 MW)
- La consommation électrique d'une ville de 80,000 habitants

En France le prix de revient du MW/h est de l'ordre de 5€, le prix de vente aux particuliers est de l'ordre de 75€
100MW, 200,000 €/jour



Le Cloud Computing



SaaS

PaaS

IaaS

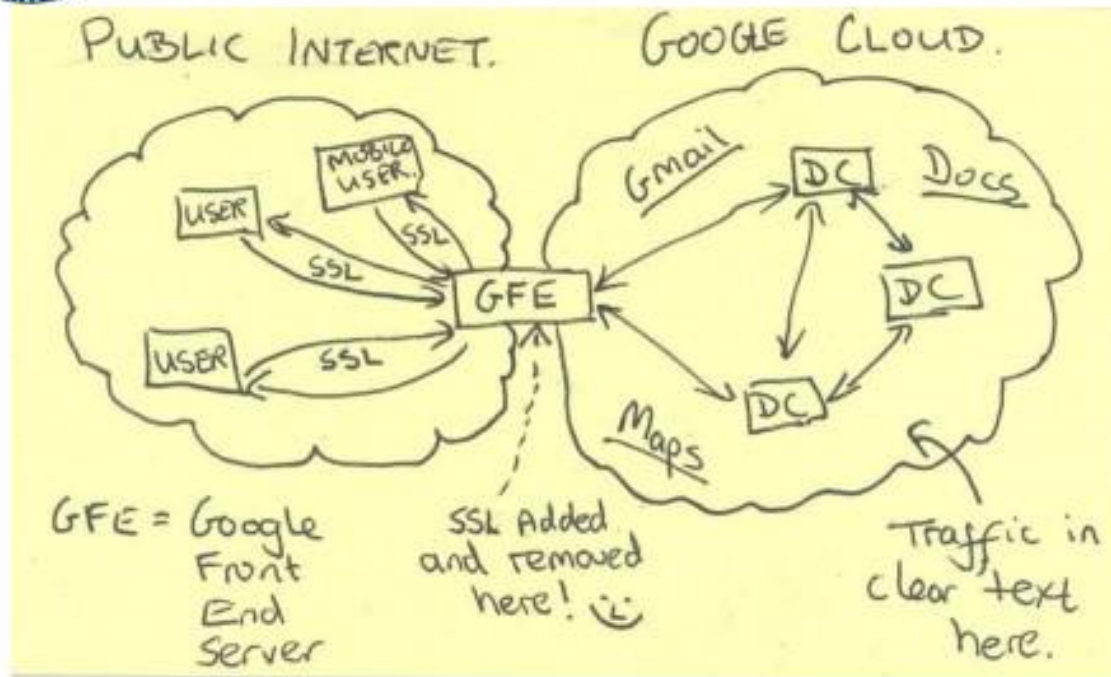


En 2013 les échanges entre les data center de google ne sont pas chiffrés

TOP SECRET//SI//NOFORN



Current Efforts - Google



TOP SECRET//SI//NOFORN

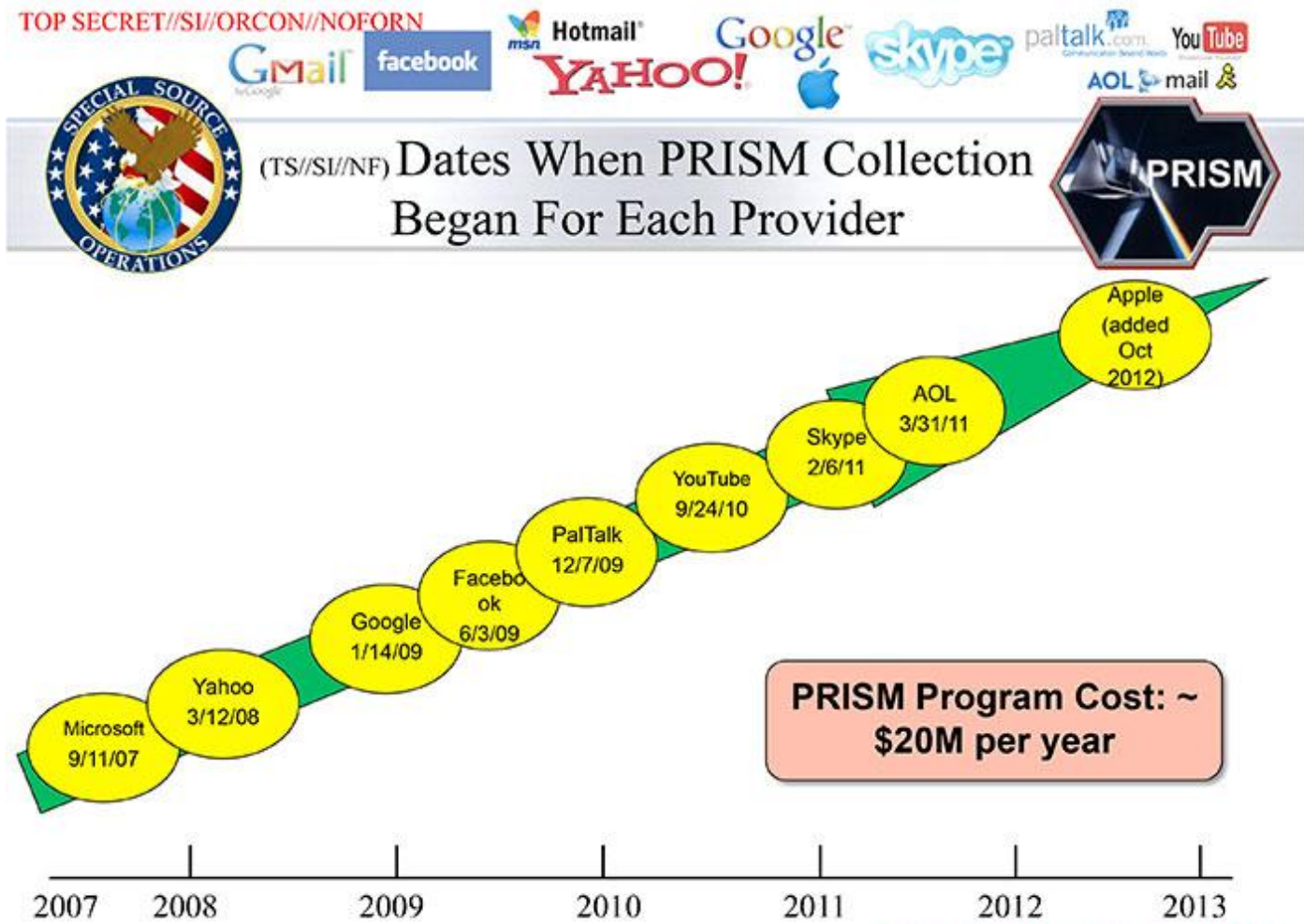
http://www.washingtonpost.com/world/national-security/nsa-infiltrates-links-to-yahoo-google-data-centers-worldwide-snowden-documents-say/2013/10/30/e51d661e-4166-11e3-8b74-d89d714ca4dd_story.html



Le Cloud Privé Google

Some of Google's data-center locations





TOP SECRET//SI//ORCON//NOFORN

<http://www.washingtonpost.com/wp-srv/special/politics/prism-collection-documents/>



TOP SECRET//SI//ORCON//NOFORN



facebook



Hotmail

YAHOO!

Google



skype

paltalk.com

YouTube

AOL

mail

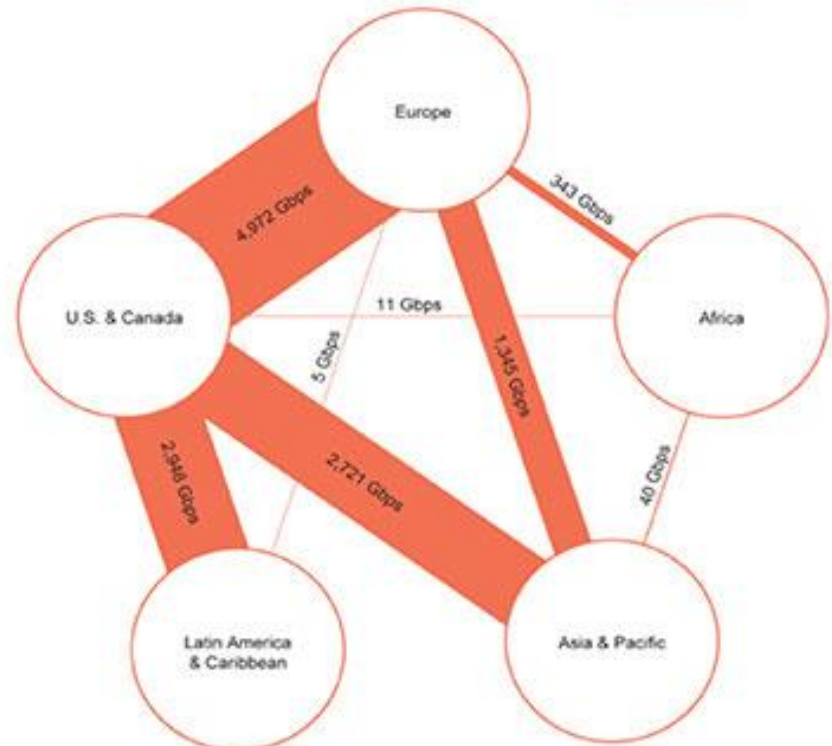


(TS//SI//NF) Introduction

U.S. as World's Telecommunications Backbone



- Much of the world's communications flow through the U.S.
- A target's phone call, e-mail or chat will take the **cheapest** path, **not the physically most direct** path – you can't always predict the path.
- Your target's communications could easily be flowing into and through the U.S.



International Internet Regional Bandwidth Capacity in 2011

Source: Telegeography Research

COM
Tech

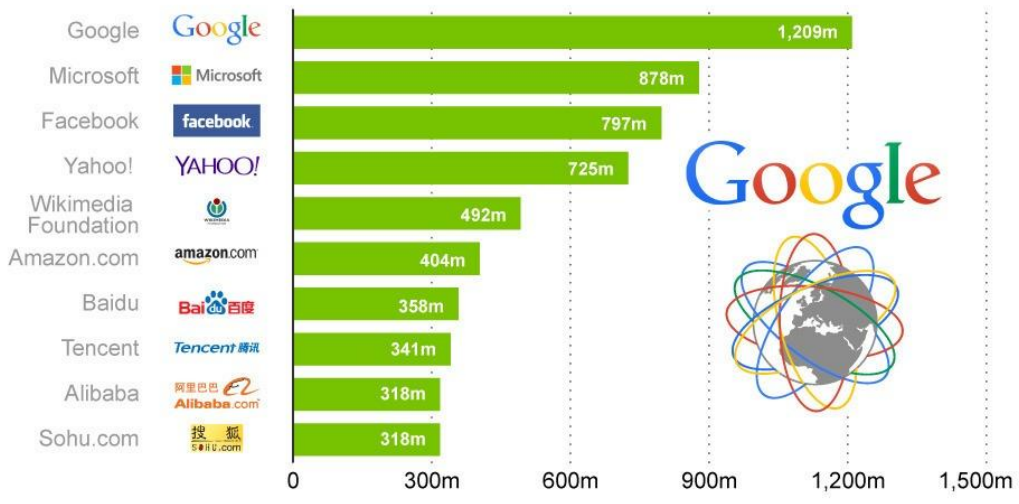
TOP SECRET//SI//ORCON//NOFORN

This chart shows the 10 companies that reach the largest audience online. In July 2013, Google's various websites reached a total of 1.2 billion people across the globe!

Internet Business

These Companies Control the Internet

Worldwide unique visitors of web properties owned by the following companies in July 2013 (in millions)



Company	Employee S	Sales M\$
Microsoft	99,000	77,849
Google Inc	47,556	59,825
Tencent Holdings Ltd	27,492	9,831
Facebook Inc	6,337	7,872
Baidu Inc	31,676	5,196
Yahoo! Inc	12,200	4,680

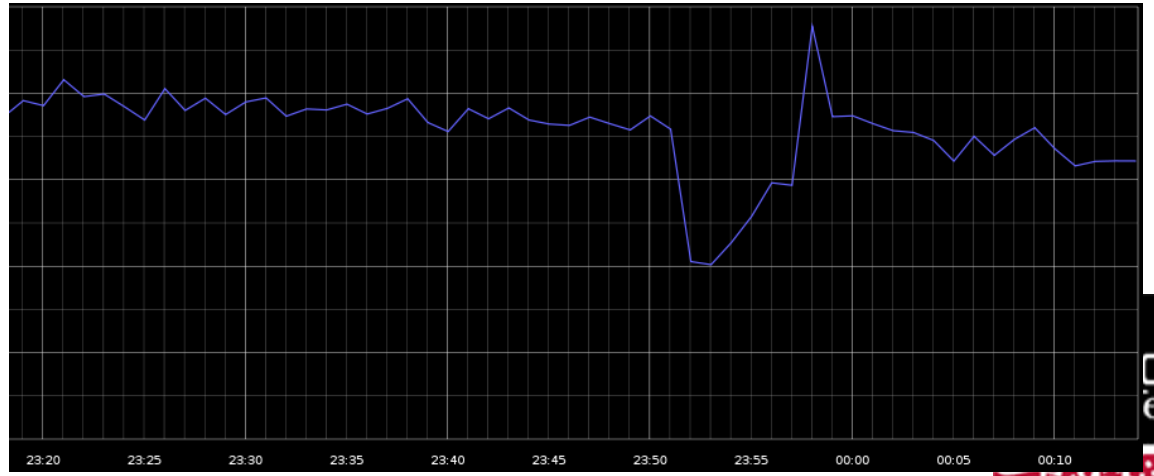
statista
The Statistics Portal

Mashable

Source: comScore

Fascinating Number: Google Is Now 40% Of The Internet

Google.com was down for a few minutes between 23:52 and 23:57 BST on 16th August 2013. This had a huge effect in the number of page views coming into GoSquared's real-time tracking – around a 40% drop, as this graph of our global page



17/137 views per minute shows
Pr Pascal URIEN, Telecom ParisTech

DMech

Internet Traffic and Net Neutrality

Netflix, YouTube gobble up half of Internet traffic

Paid-peering deals, which happen at interconnection points around the U.S., are not considered to be a "Net neutrality" issue by the FCC

Netflix has reached a paid-peering-interconnection agreement with Verizon, both companies confirmed to TIME on Monday.

Rank	Upstream		Downstream		Aggregate	
	Application	Share	Application	Share	Application	Share
1	BitTorrent	36.35%	Netflix	31.62%	Netflix	28.18%
2	HTTP	6.03%	YouTube	18.69%	YouTube	16.78%
3	SSL	5.87%	HTTP	9.74%	HTTP	9.26%
4	Netflix	4.44%	BitTorrent	4.05%	BitTorrent	7.39%
5	YouTube	3.63%	iTunes	3.27%	iTunes	2.91%
6	Skype	2.76%	MPEG - Other	2.60%	SSL	2.54%
7	QVoD	2.55%	SSL	2.05%	MPEG - Other	2.32%
8	Facebook	1.54%	Amazon Video	1.61%	Amazon Video	1.48%
9	FaceTime	1.44%	Facebook	1.31%	Facebook	1.34%
10	Dropbox	1.39%	Hulu	1.29%	Hulu	1.15%
		66.00%		76.23%		73.35%




Table 2 - Top 10 Peak Period Applications - North America, Fixed Access

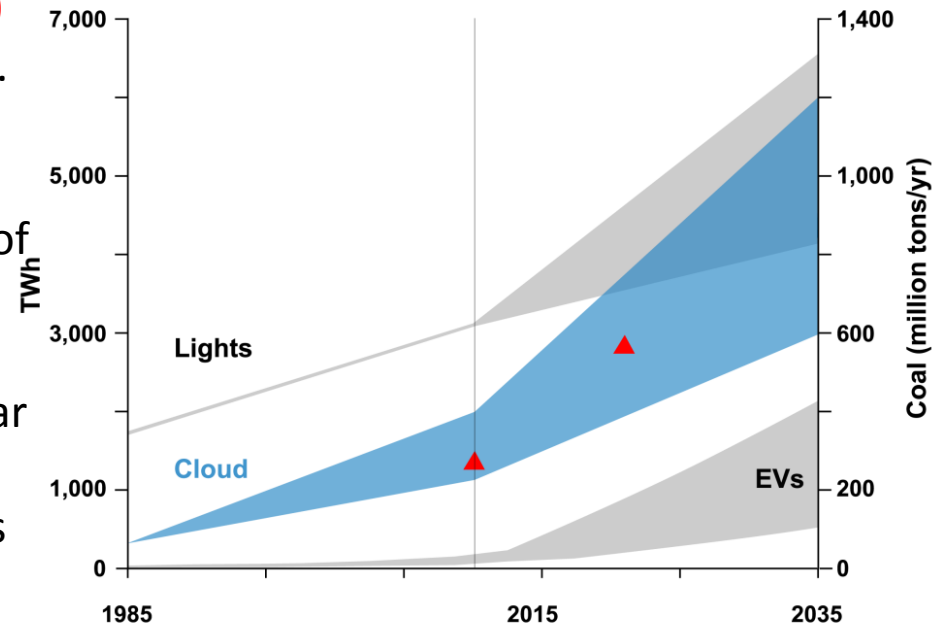
Some Cloud Figures

According to Mills, the global ICT (Information-Communications-Technologies)system is now approaching 10 percent of the world's electricity generation.

By current calculations, the cloud uses about 1,500 TWh of electricity annually, which is equal to the combined electrical generation of Japan and Germany.

In the near future, *hourly* Internet traffic will exceed the Internet's *annual* traffic in the year 2000.

The global ICT ecosystem now also consumes as much electricity as global lighting did circa 1985 (seen below).



+ RTU

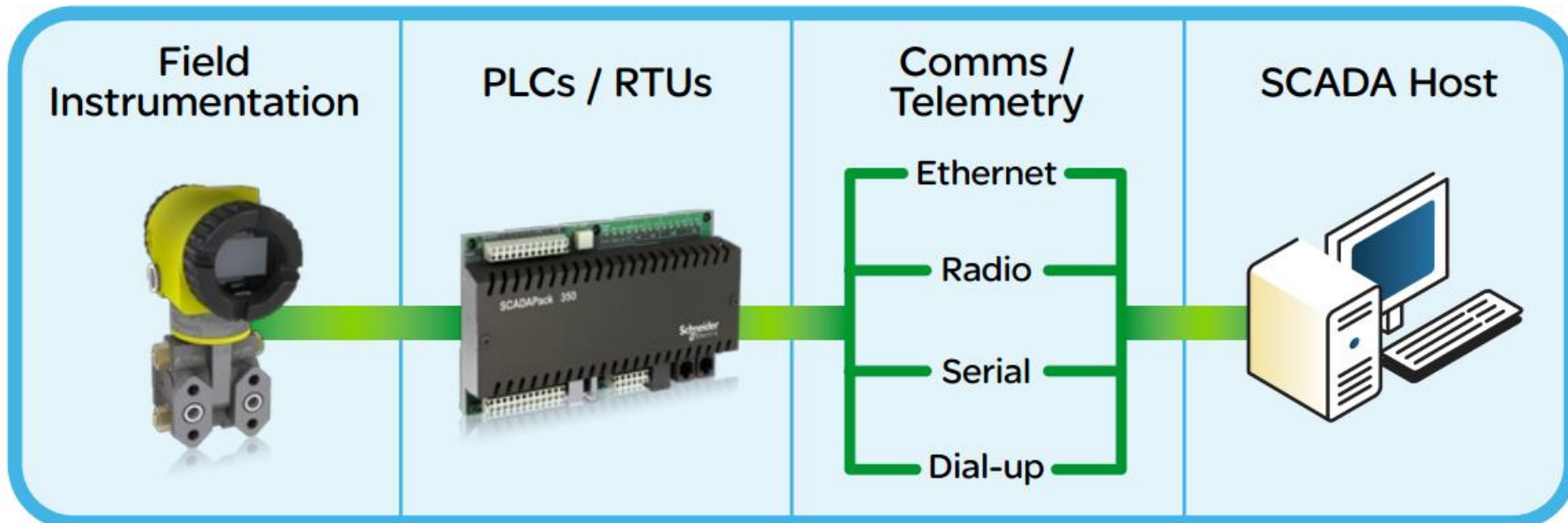
- Dispositif de télémétrie "non intelligent"

+ PLC

- RTU programmable

- Par exemple langage de programmation d'automates Siemens S7

MODBUS



Le système SCADA lit les valeurs du débit et du niveau et fixe les consignes.

Contrôle de la pompe

Pompe



PLC-1

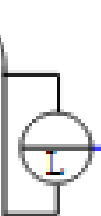
Mesure du débit



Citerne

PLC-2

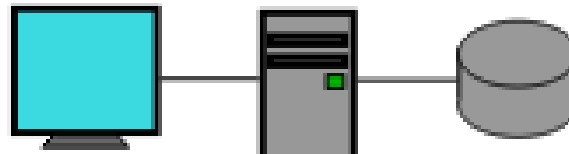
Mesure du niveau



Valve



PLC2 compare le niveau à la consigne et adapte l'ouverture de la valve en conséquence



MODBUS

PLC1 compare le débit à la consigne et adapte la vitesse de la pompe en conséquence.

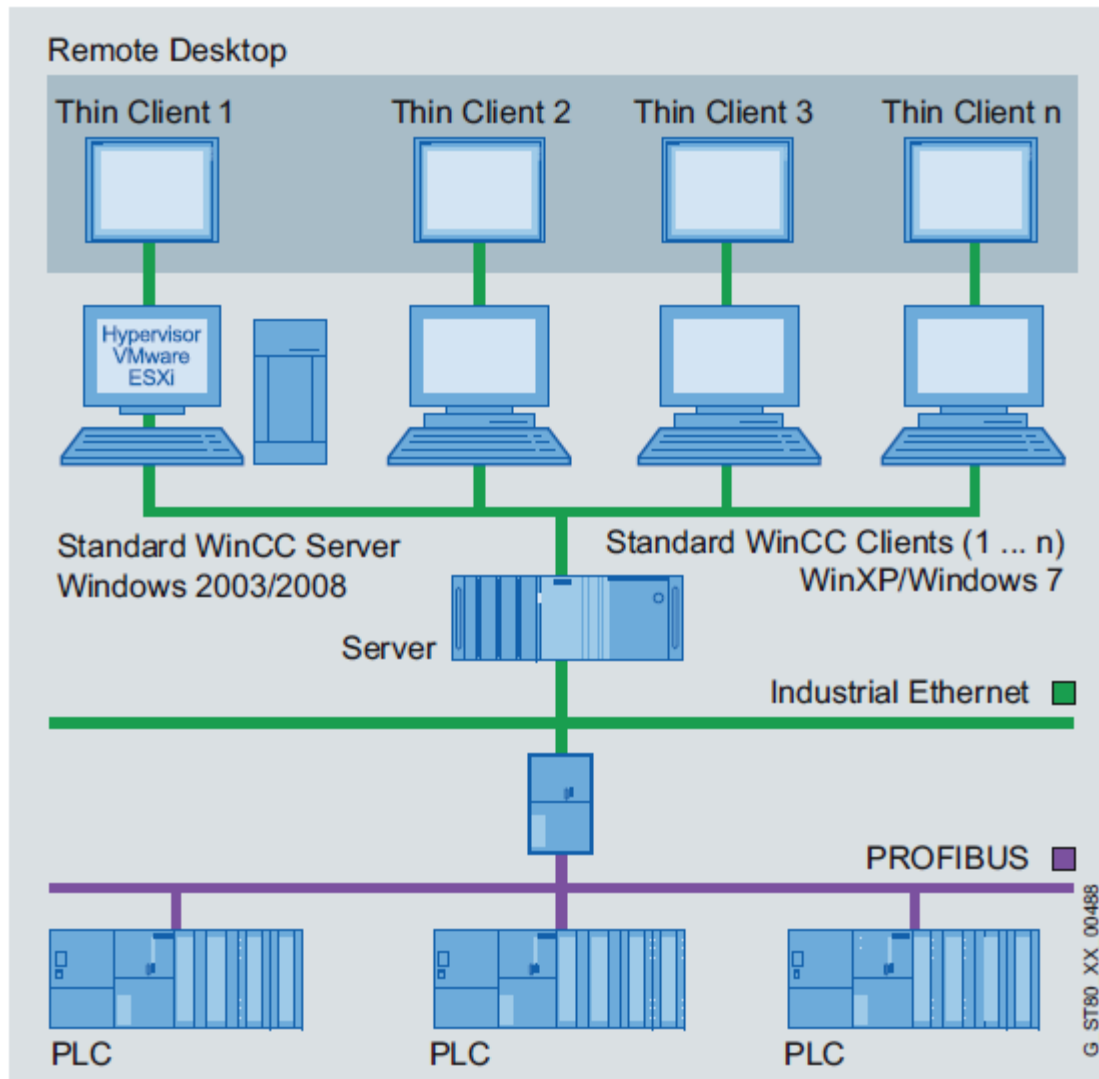


Attaques

Year	Incident	Location
2000	Sewage-processing plant attack by a former employee	Maroochy, Australia
2003	Nuclear power plant system was disabled via the Slammer worm	Ohio, USA
2008	Train derailment due to hacking	Lodz, Poland
2009	Traffic signal system hacked	LA, California, USA
2010	Stuxnet worm destroyed uranium centrifuge operations	Natanz, Iran
2011	Ambulance service disrupted via a malware infection	New Zealand
2013	Banking and broadcasting services were disrupted	South Korea



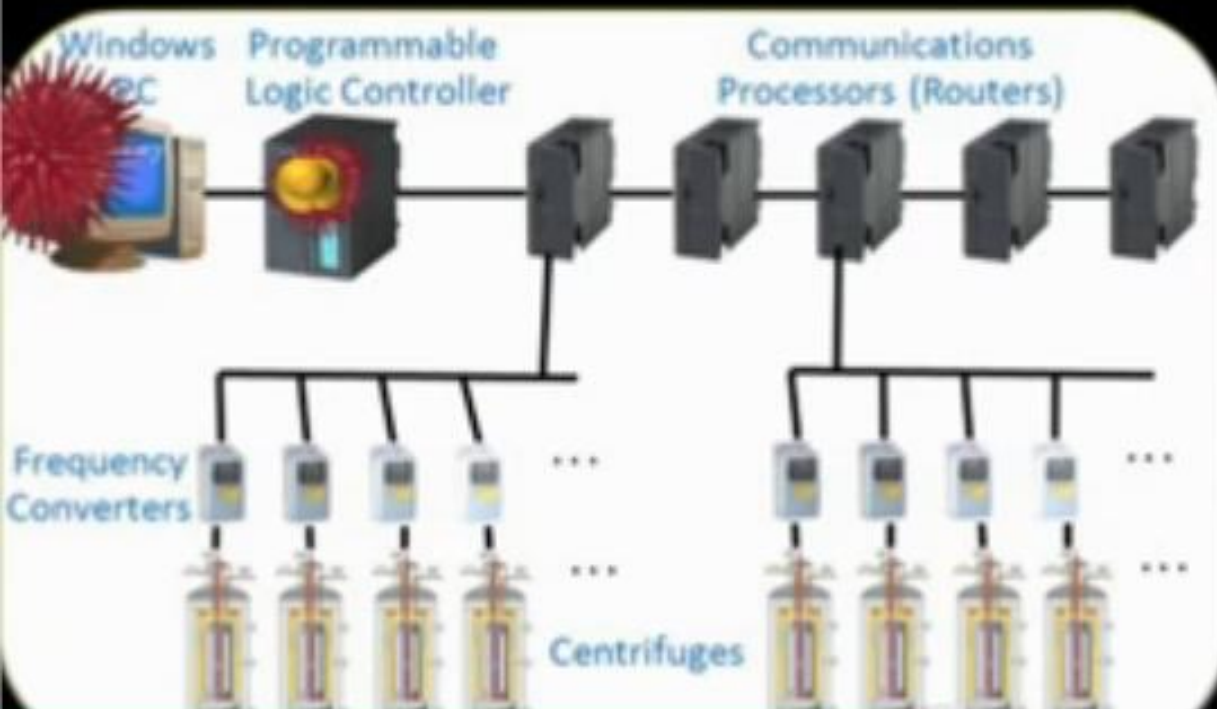
Siemens WinCC Server



- ✚ Taille du code 500 KB (versus 10 KB pour un ver ordinaire)
- ✚ De multiples mécanismes de propagation
 - Fichier, clé USB, driver d'imprimante, RPC, mot de passe par défaut de la base de donnée des logiciels PLC, mise à jour via internet via un mécanisme P2P.
 - 6 backdoors inconnus (*zero days*).
 - 🌐 Ce qui implique probablement l'analyse des codes source de Windows.
- ✚ La cible est un ordinateur équipé du logiciel siemens STEP7
 - Le PLC doit être connecté a au moins 6 modules réseau (CP-342-5) Siemens contrôlant 155 générateur de fréquences associés aux centrifugeuses
- ✚ Le logiciel Stuxnet est signé par des clés d'éditeurs de logiciels antivirus, préalablement dérobés.
- ✚ Stuxnet a détruit environ 1000 centrifugeuses iraniennes

Now Stuxnet gets down to business...

Once it's sure, the malicious PLC logic begins its mischief!



Stuxnet raises the spin rate to **1410Hz** for **15 mins.**

Then sleeps for **27 days.**

Then slows the spin rate to **2Hz** for **50 mins.**

Then sleeps for **27 days.**

Stuxnet repeats this process over and over.

Sécurité & Réseaux



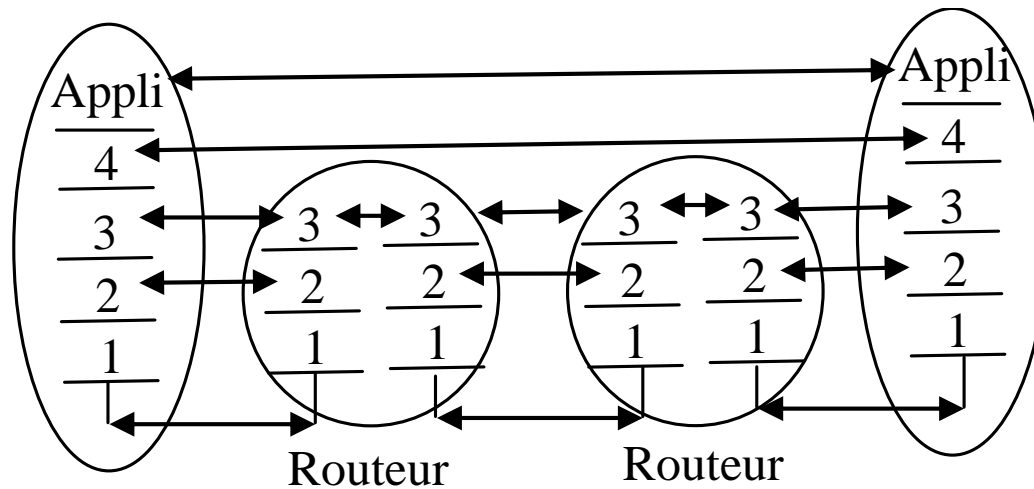
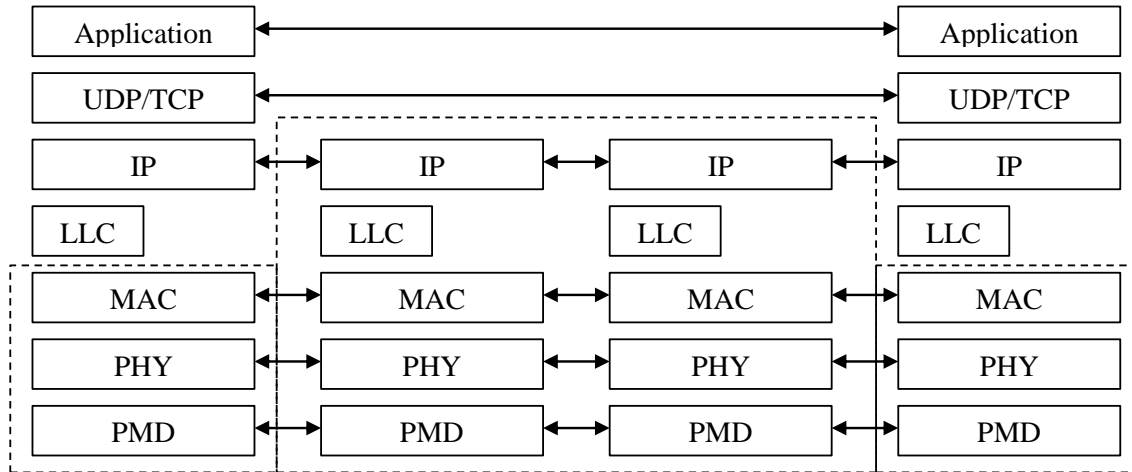
- ✚ L'identification (identity).
 - L'utilisateur d'un système ou de ressources diverses possède une identité (une sorte de clé primaire d'une base de données) qui détermine ses lettres de crédits (credential) et ses autorisations d'usage. Cette dernière peut être déclinée de multiples manières, compte utilisateur (login) d'un système d'exploitation ou techniques biométriques empreinte digitale, empreinte vocale, schéma rétinien...
- ✚ L'authentification (authentication).
 - Cette opération consiste à faire la preuve de son identité. Par exemple on peut utiliser un mot de passe, ou une méthode de défi basée sur une fonction cryptographique et un secret partagé. L'authentification est simple ou mutuelle selon les contraintes de l'environnement.
- ✚ La confidentialité (privacy).
 - C'est la garantie que les données échangées ne sont compréhensibles que pour les deux entités qui partagent un même secret souvent appelé association de sécurité (SA). Cette propriété implique la mise en oeuvre d'algorithmes de chiffrements soit en mode flux (octet par octet, comme par exemple dans RC4) soit en mode bloc (par exemple par série de 8 octets dans le cas du DES).
- ✚ L'intégrité des données (MAC, Message Authentification).
 - Le chiffrement évite les écoutes indiscretes, mais il ne protège pas contre la modification des informations par un intervenant mal intentionné. Des fonctions à sens unique (encore dénommées empreintes) telles que MD5 (16 octets) ou SHA1 (20 octets) réalisent ce service. Le MAC peut être associé à une clé secrète (HMAC(Message, clé), Keyed-Hashing for Message Authentification).
- ✚ La non-répudiation.
 - Elle consiste à prouver l'origine des données. Généralement cette opération utilise une signature asymétrique en chiffrant l'empreinte du message avec la clé RSA privée de son auteur (RSA(Empreinte(Message))).
- ✚ On cite parfois un sixième attribut relatif à la sûreté de fonctionnement (disponibilité, résilience) du système.



- ✚ La confiance est une relation sans propriétés particulières.
 - *Réflexivité*, ai-je confiance en moi-même (pas dans tous domaines).
 - *Symétrie*, je fais confiance au pilote de l'avion ou au chirurgien, la réciproque n'est pas forcément vraie.
 - *Transitivité*, j'ai confiance dans le président, le président a confiance en la présidente, je n'ai pas obligatoirement confiance dans la présidente.
- ✚ Les infrastructures PKI supposent une transitivité de la relation de confiance. Le client du réseau et un serveur d'authentification partagent une même autorité de certification (CA), qui crée une classe de confiance basée sur une relation R (R signifiant= «fait confiance à»).
- (Client R CA) ET (Serveur R CA) => (Client R Serveur)



La sécurité appliquée aux réseaux



Comment sécuriser une pile réseau ?

- ✚ **PHY- Le chiffrement au niveau physique sur des liaisons point à point.**
 - Par exemple cryptographie quantique (PMD), saut de fréquences pseudo aléatoire, ou chiffrement 3xDES du flux octets (une méthode couramment déployée par les banques). Dans ces différentes procédures les clés sont distribuées manuellement.
- ✚ **MAC- Confidentialité, intégrité de données, signature de trames MAC.**
 - C'est la technique choisie par les réseaux sans fil 802.11. La distribution des clés est réalisée dans un plan particulier (décrit par la norme IEEE 802.1x). Dans ce cas on introduit la notion de contrôle d'accès au réseau LAN, c'est à dire à la porte de communication avec la toile d'araignée mondiale. C'est une notion juridique importante, le but est d'interdire le transport des informations à des individus non authentifiés (et donc potentiellement criminels...)
- ✚ **TCP/IP- Confidentialité, intégrité de données, signature des paquets IP et/ou TCP.**
 - C'est typiquement la technologie IPSEC en mode tunnel. Un paquet IP chiffré et signé est encapsulé dans un paquet IP non protégé. En effet le routage à travers l'Internet implique l'analyse de l'en tête IP, par les passerelles traversées. IPSEC crée un tunnel sécurisé entre le réseau d'accès et le domaine du fournisseur de service. On peut déployer une gestion manuelle des clés ou des protocoles de distribution automatisés tels que ISAKMP. La philosophie de ce protocole s'appuie sur la libre utilisation du réseau d'accès ce qui n'est pas sans soulever des problèmes juridiques. Par exemple des criminels protègent leurs échanges de données, il est impossible aux réseaux traversés de détecter leur complicité dans le transport d'informations illégales.
- ✚ **ADDON- Insertion d'une couche de sécurité additive assurant la protection d'application telles que navigateurs WEB ou messageries électroniques.**
 - Par exemple le protocole SSL basé sur la cryptographie asymétrique réalise cette fonction. Généralement ce dernier conduit une simple authentification entre serveur et client. Il utilise un secret partagé (Master Secret) à partir duquel on dérive des clés de chiffrements utilisées par l'algorithme négocié entre les deux parties. Par exemple dans le cas d'une session entre un navigateur et un serveur bancaire, le client authentifie son service bancaire. Une fois le tunnel sécurisé établi le client s'authentifie à l'aide d'un login et d'un mot de passe. Il obtient alors une identité temporaire associée à un simple cookie.
- ✚ **APPLICATION- Gestion de la sécurité par l'application elle même.**
 - Ainsi le protocole S-MIME réalise la confidentialité, l'intégrité et la signature des contenus critiques d'un message électronique.



+ MAN - WAN

- Deux classes de réseaux selon que les bandes de fréquences soient soumises à licence ou non, par exemple Wi-Fi et WiMobile (IEEE 802.16e)
- Contrôle des accès, généralement avec une infrastructure centralisée (AAA, Authentication Authorization Accounting)
- Confidentialité, non répudiation (signature des trames)
- **Assurer la rentabilité financière du service**

+ WLAN

- Réseaux privés ou d'entreprises
- Contrôle des accès
- Confidentialité, non répudiation
- **Contrôler les accès au réseau de l'entreprise, éviter la fuite d'information.**

+ WPAN

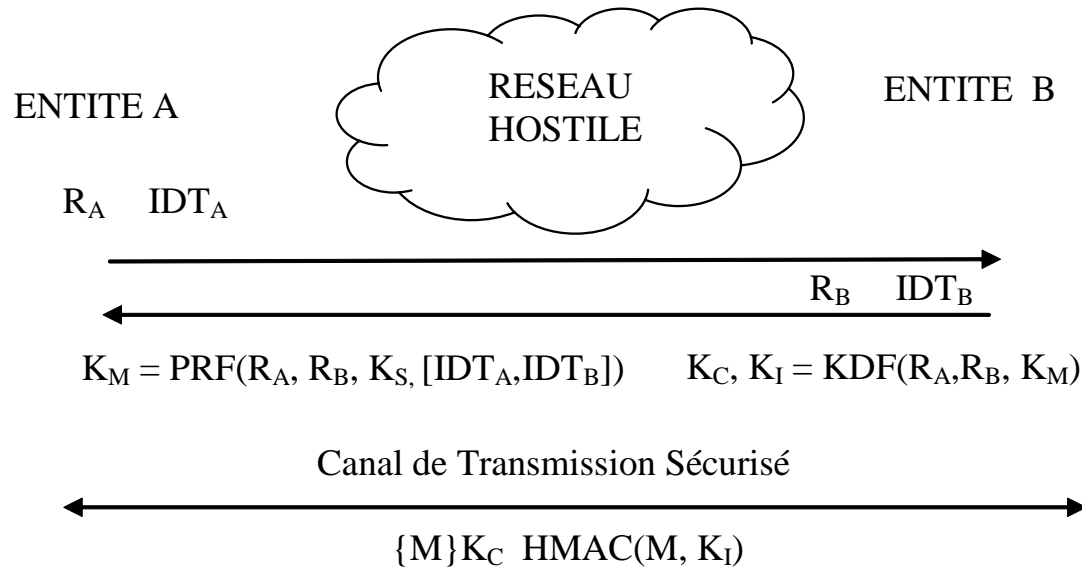
- Réseaux personnels.
- Appairage entre terminaux et périphériques.
- **Obtenir une architecture fonctionnelle, éviter la fuite d'information**



- ✚ **Clés symétriques distribuées manuellement**
 - Out Of Band
 - Pas de serveur d'authentification centralisé
- ✚ **Clés symétriques distribuées automatiquement**
 - Serveur d'authentification centralisé
- ✚ **Vecteurs d'authentification**
 - GSM, UMTS
 - Serveur d'authentification central ou réparti
- ✚ **Architecture basée sur des clés asymétriques**
 - Distribution de certificats et de clés RSA privées
 - Architecture répartie ou centralisée
 - Problème de la révocation

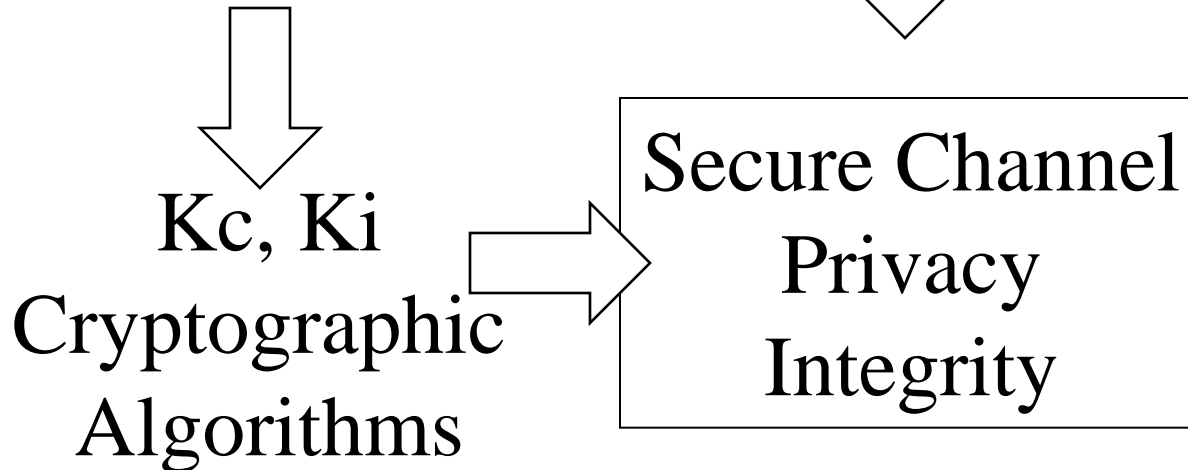
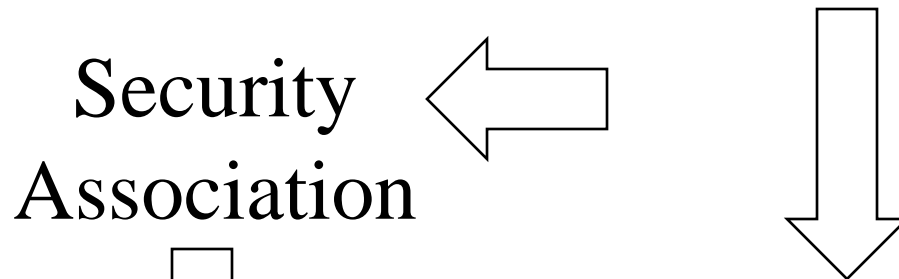
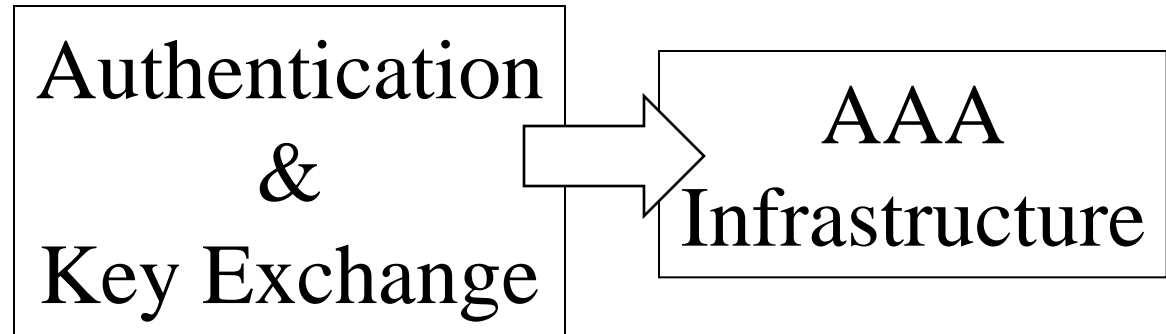


Création d'un canal sécurisé



- ✚ La procédure d'authentification d'une paire d'entités informatiques, parfois dénommée phase d'autorisation, consiste typiquement à échanger les identités (IDT_A et IDT_B) d'un couple d'interlocuteurs (appelés client/serveur ou initiateur/répondeur), deux nombres aléatoires (R_A, R_B) formant un identifiant unique de la session, puis d'effectuer un calcul.
- ✚ Ce dernier produit, à l'aide d'une valeur secrète (K_S) un secret maître (K_M), à partir duquel on déduit des clés de chiffrement (K_C) et d'intégrité (K_I) permettant de créer un canal sécurisé.
- ✚ Dans un contexte de cryptographie symétrique la clé K_S est distribuée manuellement ; dans un contexte de cryptographie asymétrique la clé K_S sera par exemple générée par A, mais chiffrée par la clé publique (e, n) de B ($K_S^e \bmod n$).
- ✚ La protection de l'identité est une préoccupation croissante avec l'émergence de technologies sans fil. Il existe divers mécanismes permettant d'obtenir cette propriété avec des degrés de confiance divers, par exemple grâce à la mise en œuvre de pseudonymes (tel que le TIMSI du GSM), du protocole de Diffie-Hellman, ou du chiffrement de certificats par la clé publique du serveur.

Mécanismes de base



Création d'un secret partagé Diffie-Hellman

- ✦ Un générateur g de Z^*/nZ (avec n premier) est tel que
 - $\forall x \neq 0 \exists i g^i = x \pmod{n}$.
- ✦ g est un nombre premier avec $n-1$, il existe donc $\phi(n-1)$ (nombre premiers avec $n-1$) solutions.
- ✦ Exemple $n=5, g=3$
 - $g^1 = 3, g^2 = 4, g^3 = 2, g^4 = 1$
- ✦ x est une clé privé, g^x est une clé publique
- ✦ Un échange DH permet de construire dynamiquement un secret partagé $K_s, K_s = g^{xy} = (g^x)^y = (g^y)^x$
- ✦ Hugo Krawczyk a introduit la notion de *Randomness Extractor* (XTR)
 - *Source Key Material*, $SKM = g^{xy}$
 - L'entropie de SKM ($\log_2 1/p(SK M)$) n'est pas forcément constante
 - $XTR = PRF(RA | RB, SKM) = HMAC(RA | RB, SKM)$
 - L'entropie de XTR est proche d'une constante



PRF et KDF, selon NIST Special Publication 800-108

+ PRF

- Une procédure qui génère une suite d'octets pseudo aléatoire de longueur k bits.
- $PRF(s, x)$
 - HMAC(key,x), CMAC(key,x)

+ Mode KDF compteur

- i compris entre 1 et L/k
- $KDF(i) = PRF(K, i \mid Label \mid 0x00 \mid Context \mid L)$

+ Mode KDF feedback

- i compris entre 1 et L/k
- $K(i) = PRF(K, K(i-1) \mid i \mid Label \mid 0x00 \mid Context \mid L)$



Création d'un secret partagé RSA

- ✚ C'est par exemple la procédure mise en œuvre par SSL
- ✚ Création d'un secret, PMS (Pre-Master-Secret)
- ✚ Calcul d'un Master Secret (MS)
 - $MS = KDF(PMS, RA \mid RB \mid Label)$
- ✚ Calcul des clés K_c, K_i
 - Clés = $KDF (MS, RA \mid RB \mid Label)$



Les faiblesses du protocole IP



Les faiblesses du protocole IP 1/2

- ✦ Par nature un réseau est sensible au déni de service, au niveau physique (brouillage divers...) ou logique (destruction/modification des paquets ou des trames).
- ✦ Le protocole ARP (*Address Resolution Protocol*) réalise une correspondance entre une adresse MAC et une adresse IP.
 - Dans l'attaque dite *ARP spoofing* l'attaquant forge une trame de réponse (*ARP.response*) erronée. Il en résulte un détournement du trafic IP.
- ✦ Un paquet IP comporte typiquement un en tête de 20 octets démunis d'attributs cryptographiques de sécurité.
 - La confidentialité et l'intégrité des données transportées ne sont pas assurées.
- ✦ Le mécanisme de segmentation est difficilement analysable par les pare-feu. En effet, seul le premier segment IP contient l'entête du protocole supérieur transporté, par exemple TCP ou UDP.
 - Le réassemblage peut entraîner un problème de déni de service pour la machine de réception (la taille maximale d'un paquet IP est de 65535 octets et le temps de réception des fragments est indéterminé).
- ✦ La correspondance adresse IP nom de machine est typiquement réalisée par le protocole DNS qui n'offre aucun service d'authentification ou d'intégrité.



Les faiblesses du protocole IP 2/2

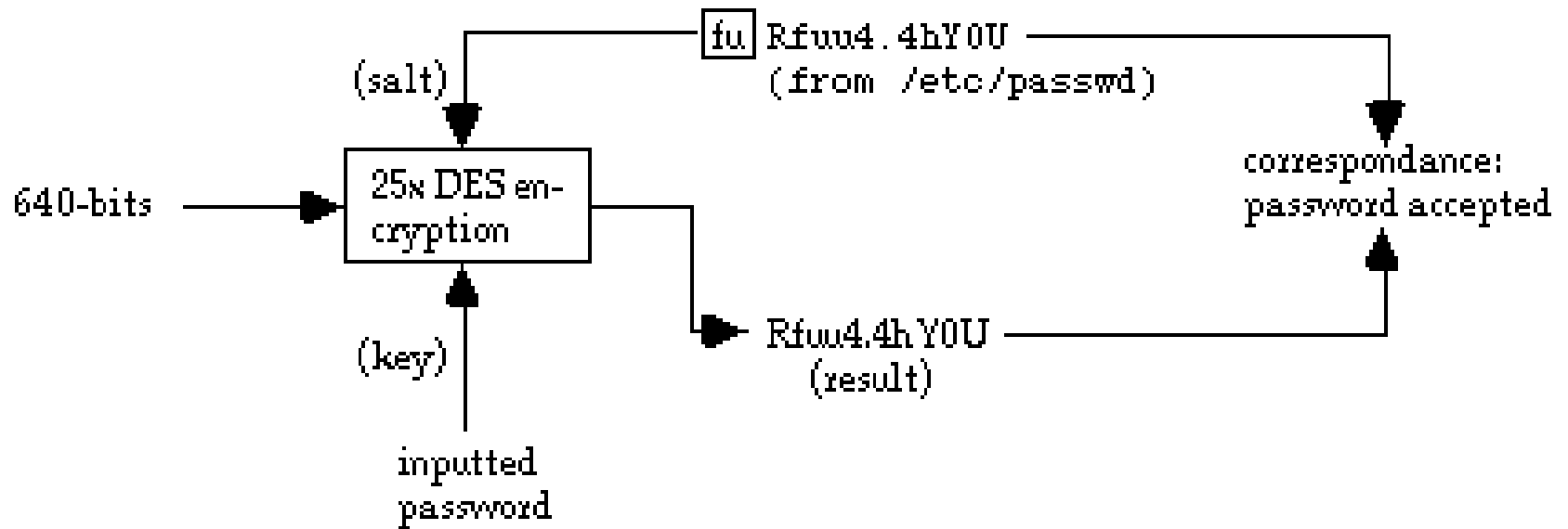
- ✚ Lorsque un pare-feu autorise les paquets ICMP, il s'expose à de possibles canaux cachés, utilisés par exemple pour dialoguer avec des chevaux de Troie, dont les informations sont transportés par des paquets ICMP.response.
- ✚ Le protocole TCP ne propose aucune authentification du serveur lors de l'ouverture d'une session (paquets SYN et ACK+SYN).
- ✚ Le SYN-Flooding est une technique d'attaque de déni de service qui consiste à générer en grand nombre de paquets TCP-SYN.
- ✚ L'analyse des ports TCP (en mode serveur) ouverts d'un nœud IP (port scan) repose sur la possibilité de forger librement des paquets TCP-SYN.
- ✚ Il est possible de mettre fin à une session TCP à l'aide de paquets TCP-RESET. Connaissant l'adresse IP du client en supposant une fenêtre de réception (RWIN) de 2^{14} et une plage de ports éphémères de 2^{10} le nombre de paquets nécessaire est de l'ordre de $2^{32}/2^{14}*2^{10} = 2^{28}$.
- ✚ De nombreux protocoles (PPP, POP, FTP,...) mettent en œuvre des mots de passe transmis en clair sur le réseau. de messageries supportent un transport sécurisé par SSL



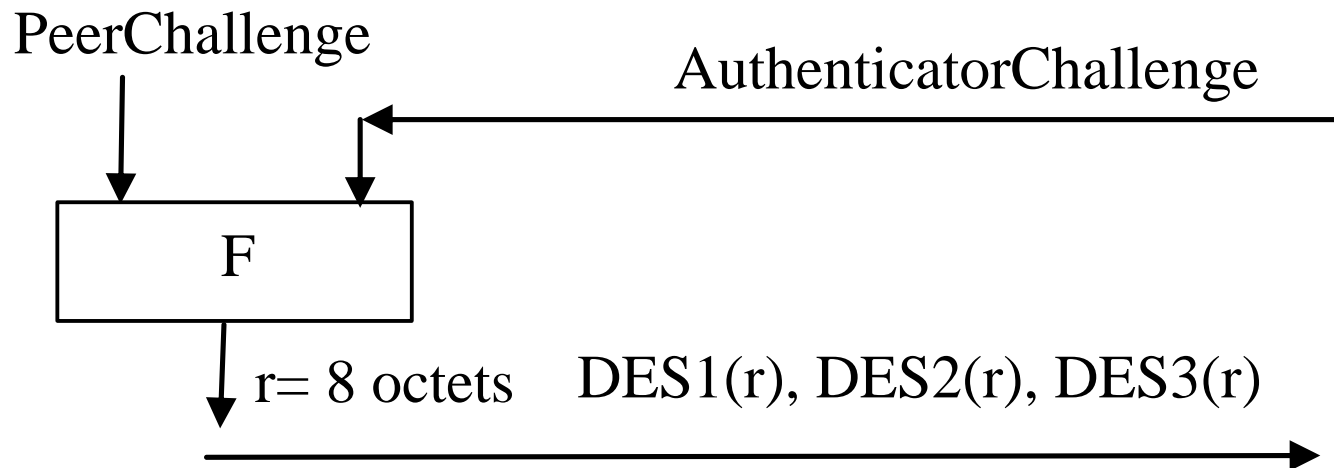
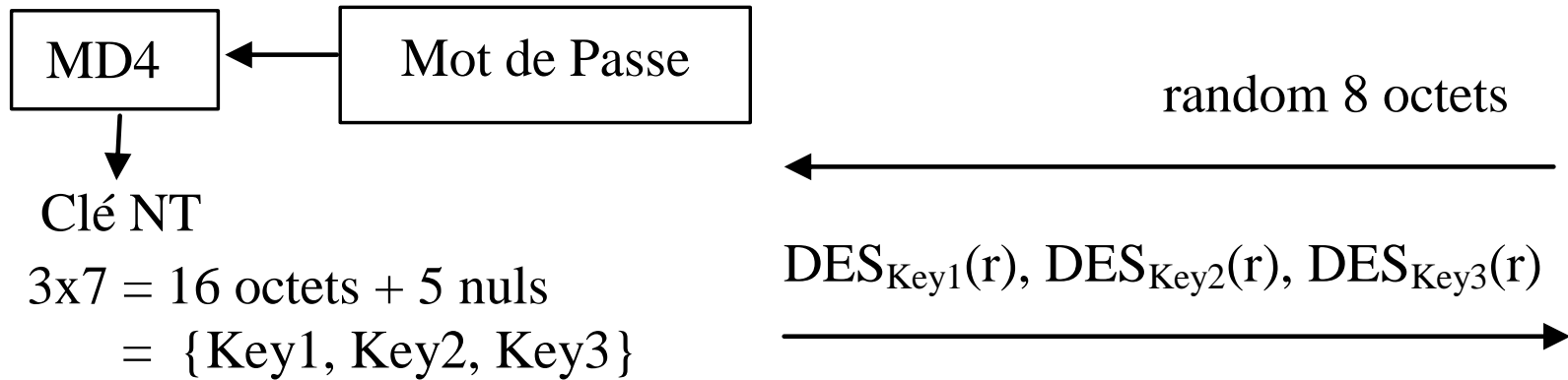
Login et Mot de passe



Mot de passe Unix

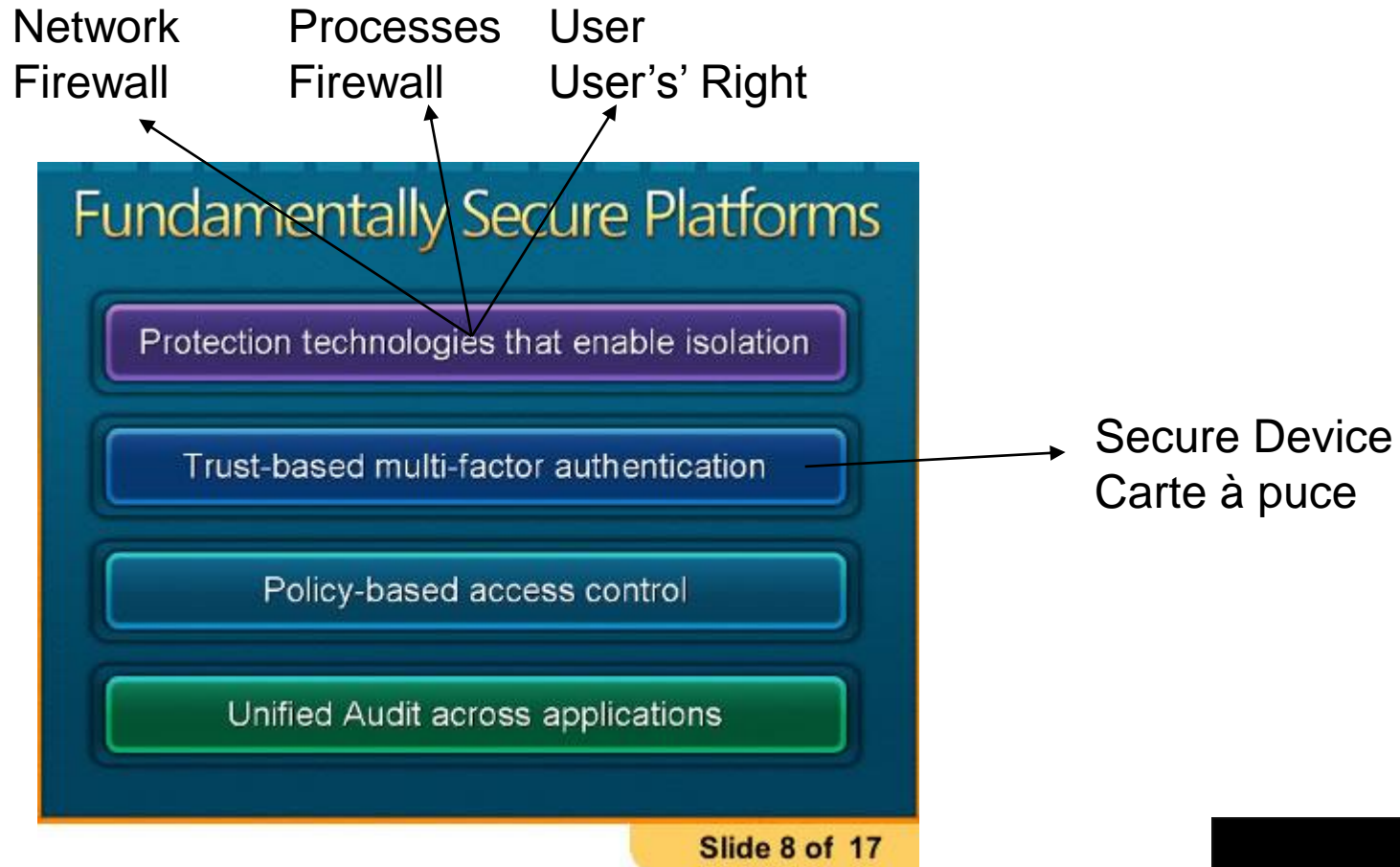


Clé NT et MSCHAPv2



Plateformes Sécurisées

Plateformes Sécurisées, Bill Gates, 2006



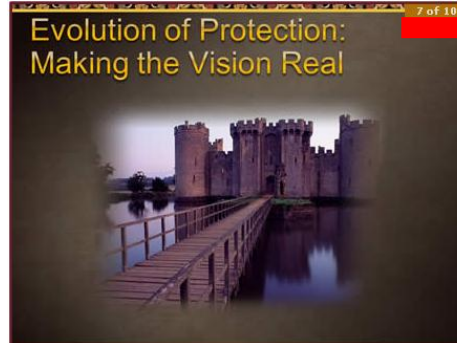
La stratégie Microsoft – Bill Gates RSA Security Conference 2007



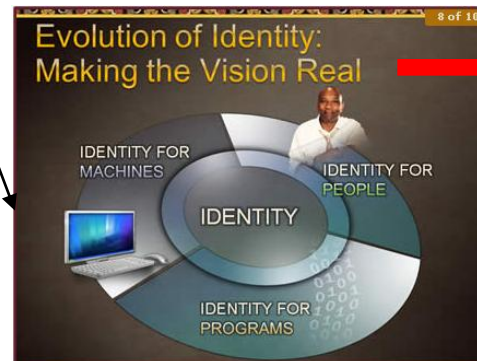
- Le mot de passe est LE problème de sécurité
- Microsoft propose l'usage généralisé de certificats



IPSEC



- Trustworthy Computing
- Des composants qui résistent aux attaques
 - TPM
 - Cartes à puce



Identité



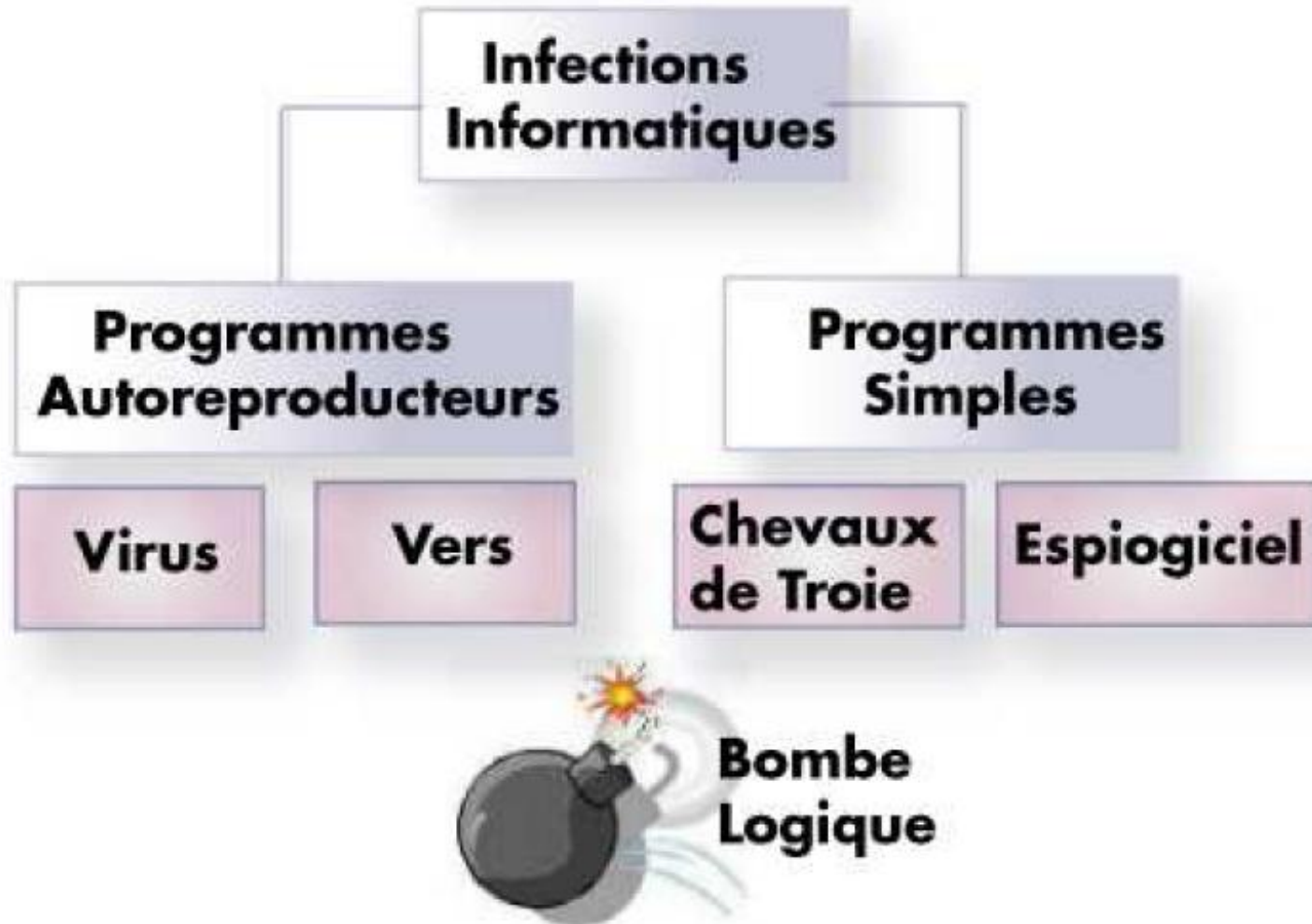
Extensibilité

Sécurité

Complexité

Connectivité

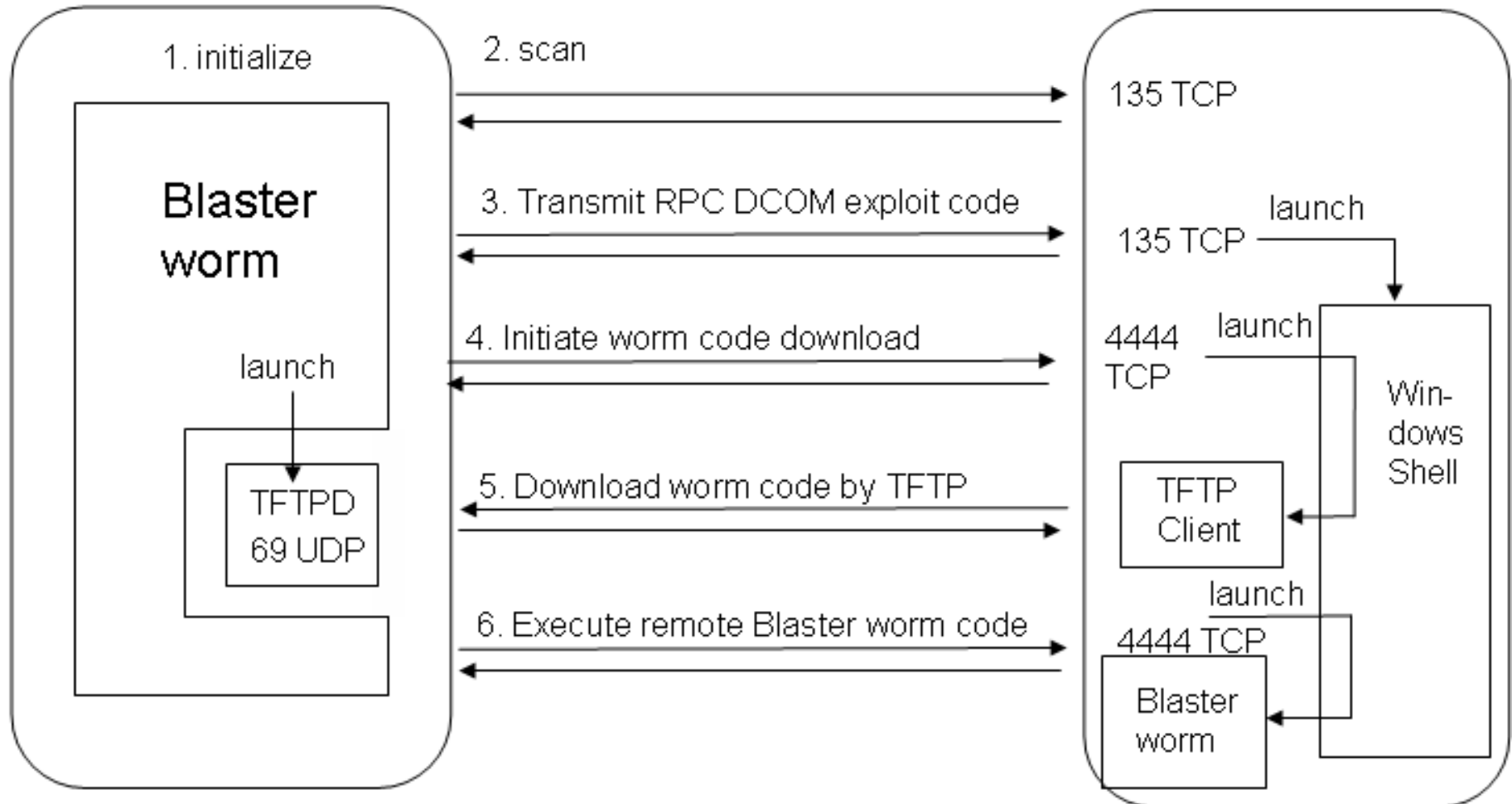
Programmes malveillants



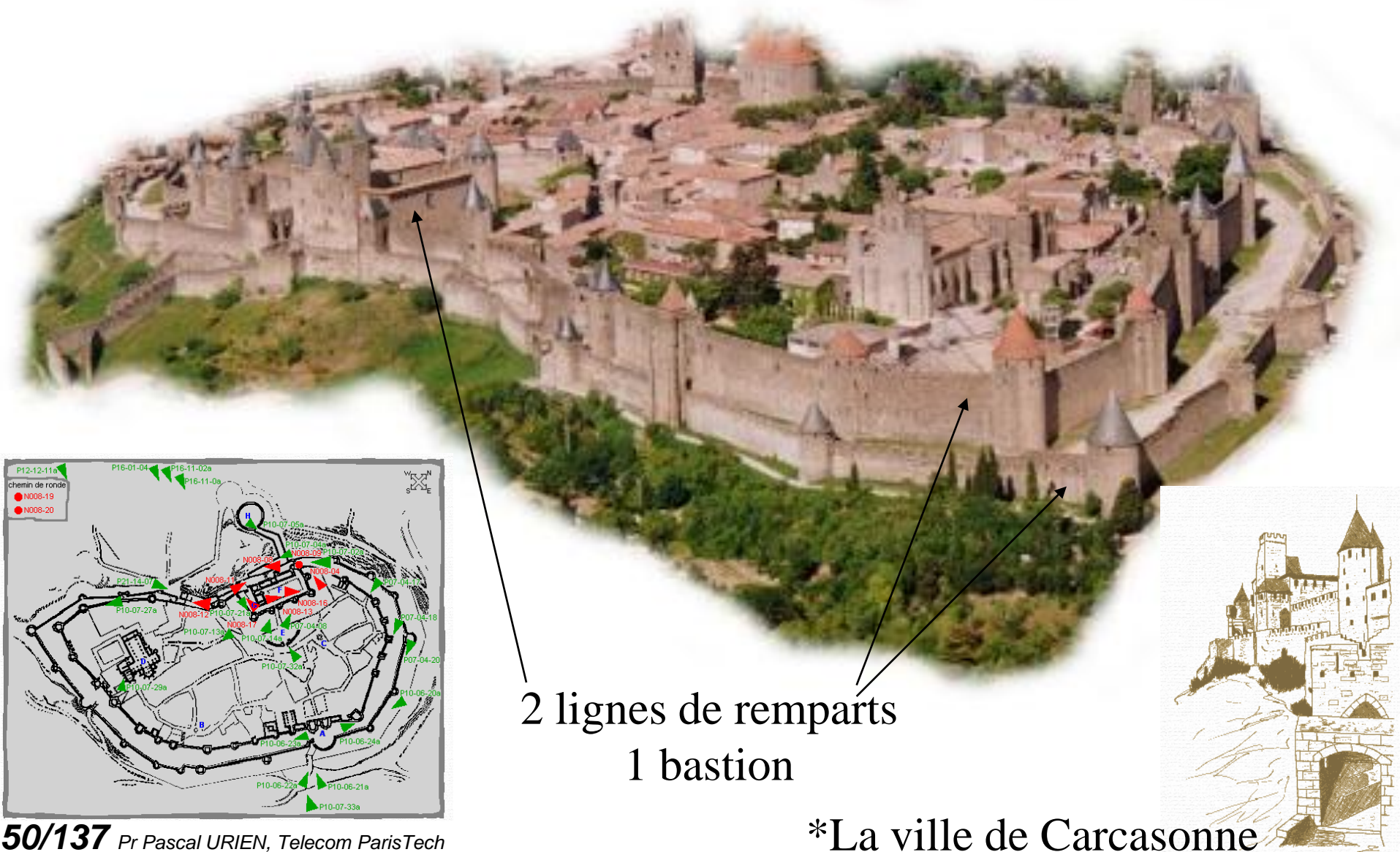
Le vers blaster (2003)

Blaster Infected Host

Victim

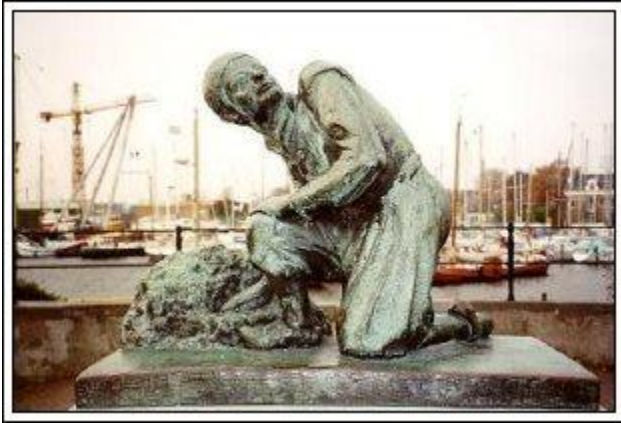


La sécurité est une construction (design)

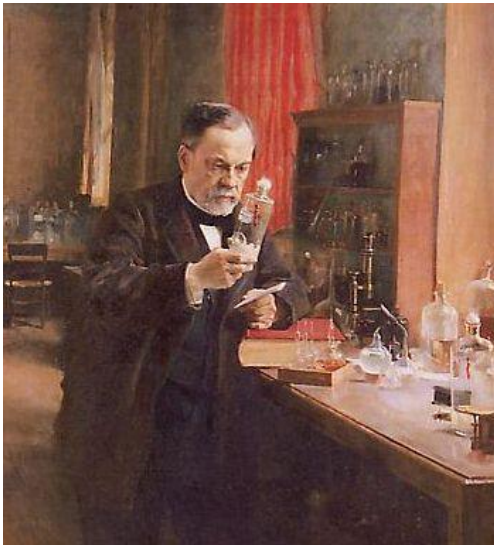


Paradigmes de sécurité

Hans Brinker Défense Immunitaire

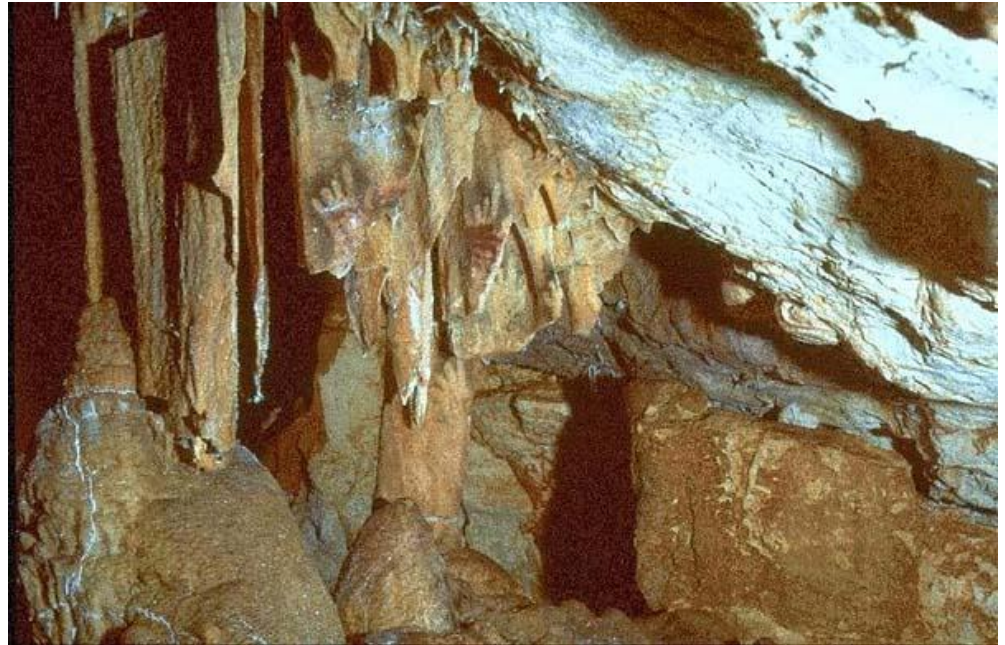


Pasteur

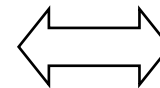


Vaccin

Grotte de Cosquer Placebo



Attaque
Connue, inconnue



Contre-mesure
efficace non efficace



Canaux Cachés



Les équations de Maxwell sont-elles sécurisées ?

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

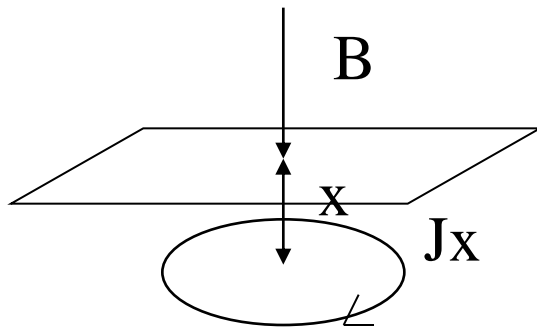
$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Courants de Foucault (*Ellis current*)

$$J_x = \left(\frac{1}{e}\right)^{(x/\delta)}$$

J_x = Current Density
 (A/m²)
 e = Base Natural Log
 x = Distance Below
 Surface
 δ = Standard Depth of
 Penetration

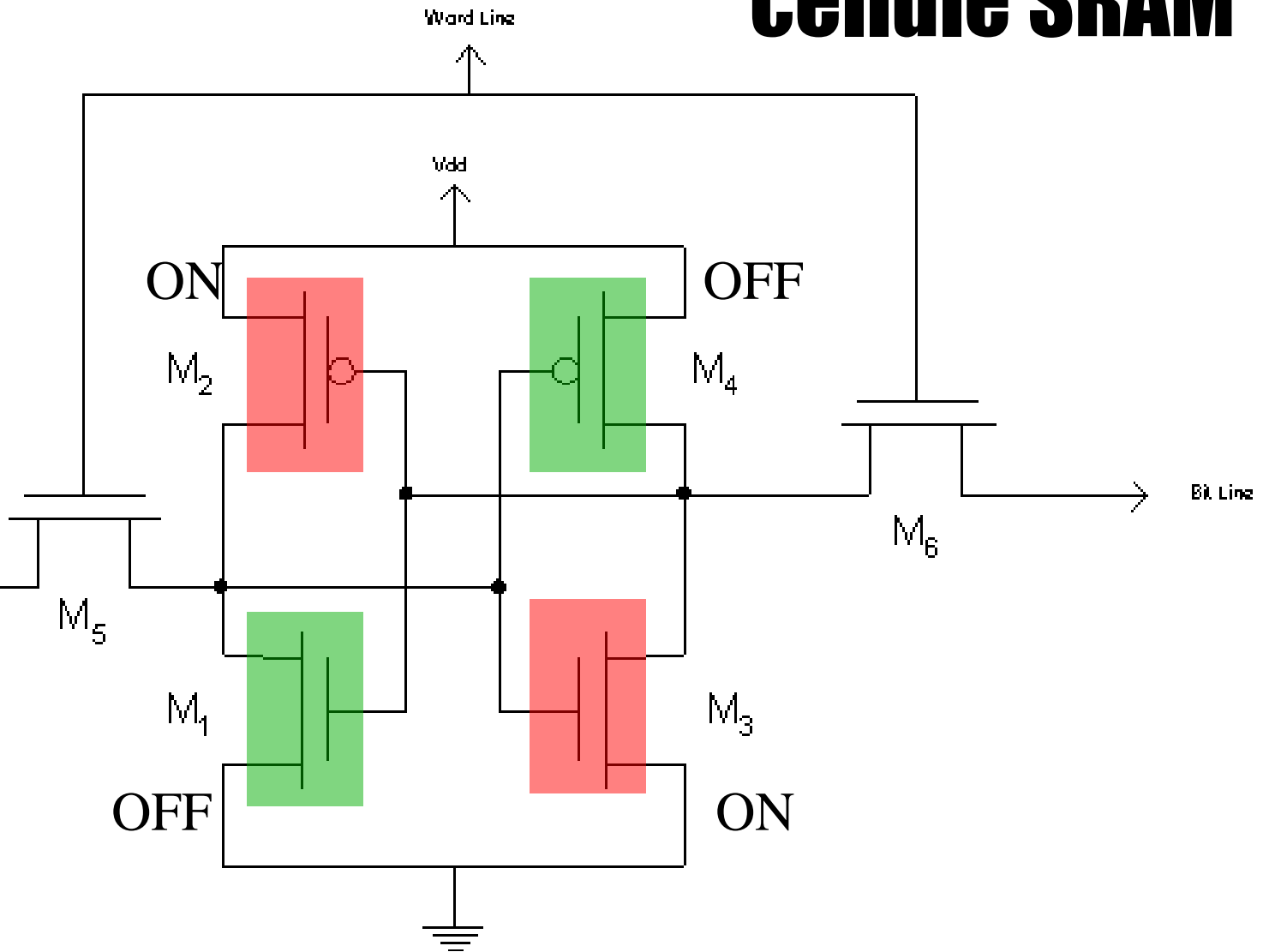


$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

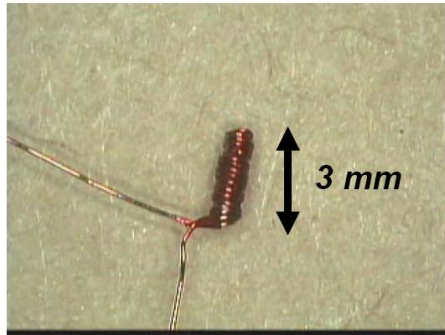
δ = Standard Depth of
 Penetration (m)
 π = 3.14
 f = Test Frequency (Hz)
 μ = Magnetic Permeability
 (Henry/m)
 σ = Electrical
 Conductivity
 (Siemens/m)

Attaque par courant de Foucault d'une cellule SRAM

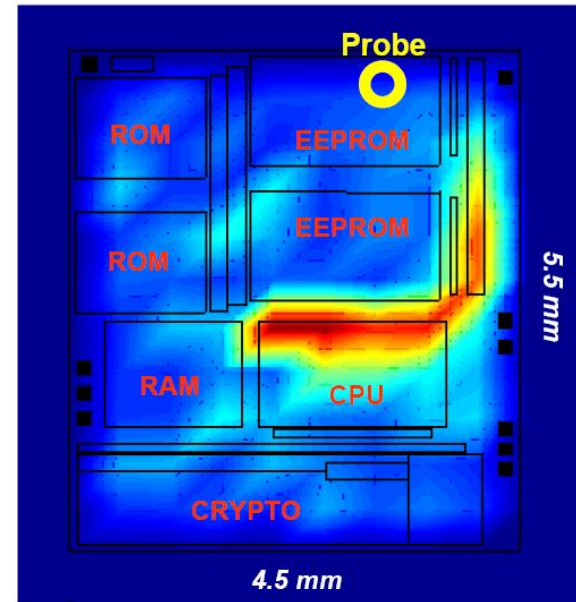
Il est possible de modifier l'état d'une cellule mémoire SRAM par courant de Foucault



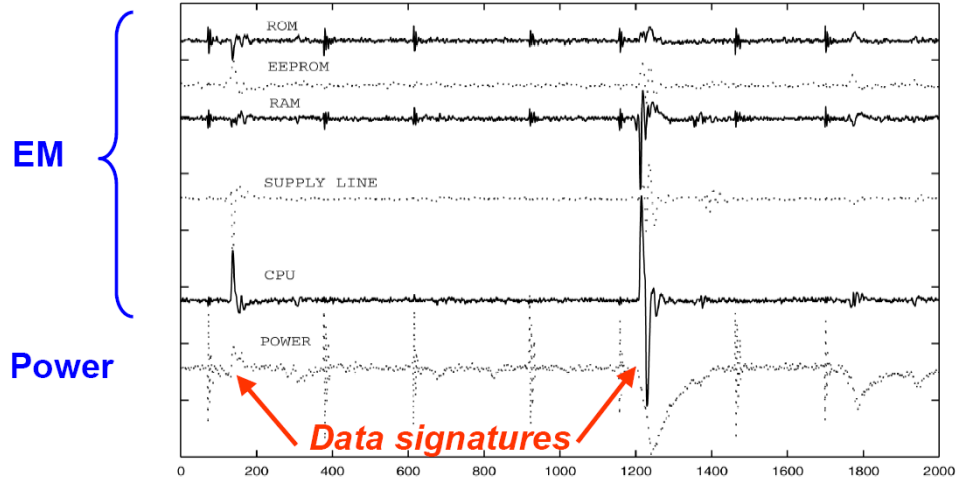
Canaux cachés et équations de Maxwell



$$V = - \frac{d\phi}{dt}$$

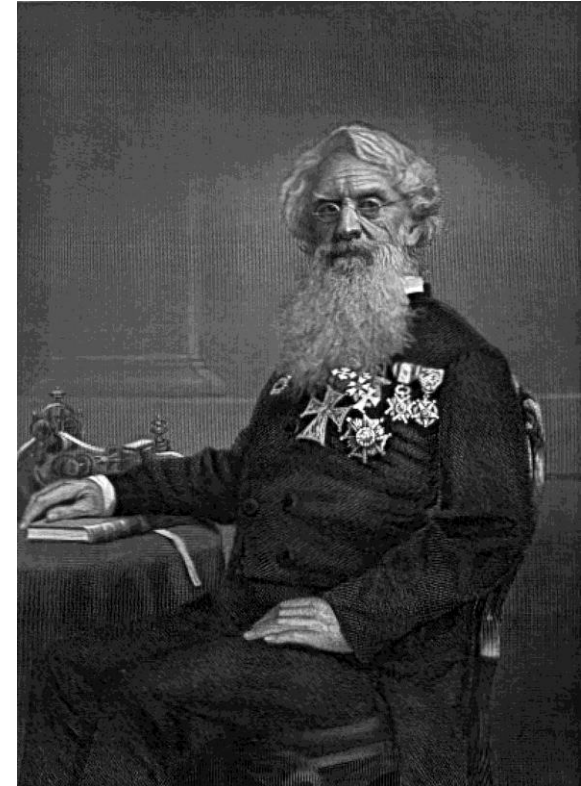


Differential traces between (00h ⊕ 00h) and (FFh ⊕ 00h) picked up at different locations



RSA & *Morse Samuel F*

A	• ■	N	■ •	1	• ■ ■ ■ ■ ■
B	■ • • •	O	■ ■ ■ ■	2	• • ■ ■ ■ ■
C	■ ■ • ■ ■ •	P	• ■ ■ ■ •	3	• • • ■ ■ ■
D	■ ■ • •	Q	■ ■ ■ • ■ ■	4	• • • • ■ ■
E	• (1 unit)	R	• ■ ■ •	5	• • • • •
F	• • ■ ■ •	S	• • • •	6	■ ■ • • • •
G	■ ■ ■ ■ •	T	■ ■ (3 units)	7	■ ■ ■ • • •
H	• • • • •	U	• • ■ ■	8	■ ■ ■ ■ ■ •
I	• •	V	• • • ■ ■	9	■ ■ ■ ■ ■ ■ •
J	• ■ ■ ■ ■ ■	W	• ■ ■ ■ ■	0	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
K	■ ■ • ■ ■	X	■ ■ • • ■ ■		
L	• ■ ■ ■ • •	Y	■ ■ • ■ ■ ■ ■		
M	■ ■ ■ ■	Z	■ ■ ■ ■ • •		



a^b modulus m

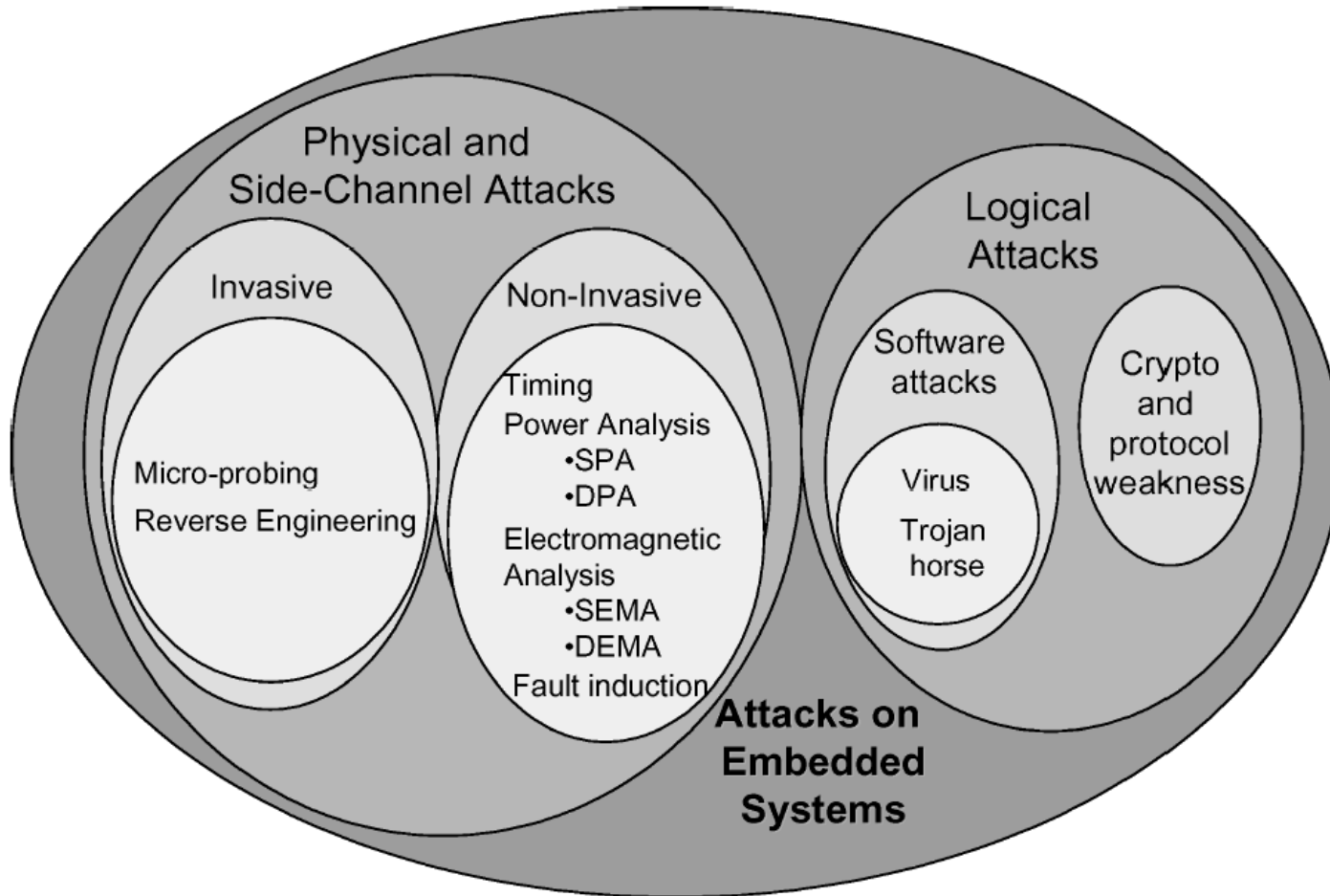
Attaque d'un *exponentiator*

- + C (forme chiffrée) = M^d modulo m
- + $d = d_0 \cdot 2^0 + d_1 \cdot 2^1 + d_2 \cdot 2^2 + d_3 \cdot 2^3 + d_4 \cdot 2^4 + \dots + d_i \cdot 2^i + \dots + d_{p-1} \cdot 2^{p-1}$,
ou d_i a pour valeur 0 ou 1.
- + La forme chiffrée s'exprime sous forme d'un produit de p termes m_i ,
 - $C = m_0 \cdot m_1 \cdot m_2 \dots m_i \dots m_{p-1}$ modulo m , avec
 - $m_i = 1$, si $e_i = 0$.
 - $m_i = M^{2^i}$ modulo m , si $e_i = 1$
 - $X_i = M^{2^i}$, $X_{i+1} = X_i^2$
- + En constate que, dans cette implémentation de l'algorithme RSA (dite *exponentiation*), chaque bit (d_i) de la clé implique un temps calcul différent selon que sa valeur soit 0 (multiplication triviale par 1) ou 1 (multiplication par M^{2^i}).



En fonction des différences de temps calculs observées on détermine la valeur de d_i (0 ou 1).

Attaques adressant les systèmes embarqués



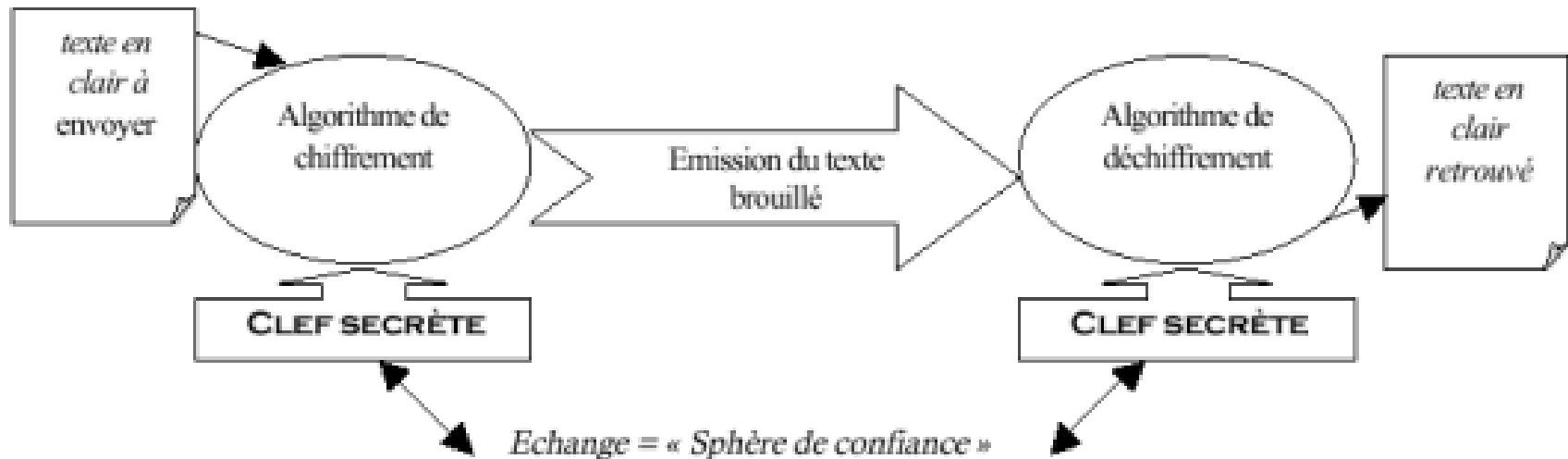
Examples of attack threats faced by embedded systems.



Rappels de Cryptographie



Chiffrement symétrique 1/3



Une seule clé de chiffrement et déchiffrement
Le chiffrement est une bijection $y=f(x)$



- ✚ Les clés de chiffrement (*cipher keys*) et de déchiffrement (*uncipher*) sont identiques.
- ✚ Les méthodes de bases du chiffrement sont

- La substitution (S-BOX): $n!$ bijections de $X[1,n]$ vers $X[1,n]$
 - Exemple le code de CESAR

Texte clair A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
 Texte codé D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z A B C

- La permutation (P-BOX) (on dit encore transposition). Un ensemble de données en clair (b éléments) est decoupe en b/p blocs de p éléments.
 - Exemple ensemble de 20 éléments divisé en 4 blocs de 5 éléments.

x1	x2	x3	x4	x5
x6	x7	x8	x9	x10
x11	x12	x13	x14	x15
X16	x17	x18	x19	x20

- Les lignes et colonnes sont permutées selon un ordre connu (la clé de permutation)

- ✚ On distingue le chiffrement par flot (*stream cipher*) et le chiffrement par bloc (*bloc cipher*).
 - RC4 est un chiffrement par flot utilisé fréquemment par le protocole SSL. Il utilise des clés d'au plus 2048 bits et chiffre un octet (8 bits)
 - DES (Digital Encryption Algorithm) utilise des clés de 56 bits et chiffre des blocs de 64 bits
 - AES (Advanced Encryption Algorithm) utilise des clés de 128 bits et chiffre des blocs de 128 bits.



- ✚ Le codage porte sur des blocs de données de 64 bits et utilise une clé unique de 64 bits (56 bits + 8 bits de parité - 1 bit /octet de parité impaire).
 - !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! 2⁵⁶ << 64!
- ✚ On utilise une permutation initiale et une permutation finale inverse de la première. 16 transformations successives (selon le procédé de **FEISTEL**) sont définies
 - Le bloc de 64 bits est divisés en un bloc gauche L (32 bits) et droit R (32 bits).
 - $L_i = R_{i-1}$
 - $R_i = L_{i-1} \text{ exor } f(R_{i-1}, K_i)$, K_i clé de l'étage i .
 - A partir de R et d'une matrice E (de 6 colonnes et 8 lignes) on produit un nombre de 48 bits qui est ajouté (exor) à une clé K de 48 bits. Ces 48 bits sont répartis en 8 groupes de 6 bits, chaque groupe subit une transformation S_i (1..8) qui produit un mot de 4 bits.
- ✚ La clé (56 bits utiles) subit une permutation PC1 (2 matrices de 7 colonnes et 4 lignes), puis est séparée en deux groupes de 28 bits (C0 et D0). On produit par des décalages à gauche et à droite successifs les blocs C_i et D_i ($i=1, \dots, 16$). Une matrice PC2 permet d'obtenir les clés K_i à partir de C_i et D_i ($i=1, \dots, 16$)
- ✚ En pratique DES est utilisé selon l'algorithme dit triple DES, avec deux clés de 56 bits
 - $Y = E1 \circ D2 \circ E1(x)$
- ✚ Il existe des attaques qui permettent de retrouver une clé DES à partir de 2⁴⁰ blocs (préalablement connus) chiffrés

Chiffrement symétrique : notion d'entropie 3/3

- ✦ Claude Shannon a défini la notion d'entropie de l'information
 - $H = - \sum p(x) \log_2 p(x)$, soit $\log_2(n)$ pour n symboles équiprobables
- ✦ L'entropie conditionnelle de X sachant Y s'écrit
 - $H(X|Y) = - \sum p(X=x, Y=y) \log_2 p(X=x, Y=y)$
 - $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$
- ✦ Un système cryptographique parfait au sens de Shannon est tel que
 - $H(M|C) = H(M)$, M le message en clair et C le message chiffré par une clé K .
- ✦ Par exemple une clé constituée par une suite d'octets aléatoires k_1, k_2, \dots, k_i réalise un système cryptographique parfait ($C_i = k_i \text{ exor } M_i$, $M_i = k_i \text{ exor } C_i$), c'est le code dit de *Vernam*.
- ✦ En particulier si tous les messages en clair sont équiprobables la taille de la clé doit être au moins aussi grande que la taille des messages en clair.

Il faut rafraichir
une clé de
chiffrement !



$$- \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i)$$

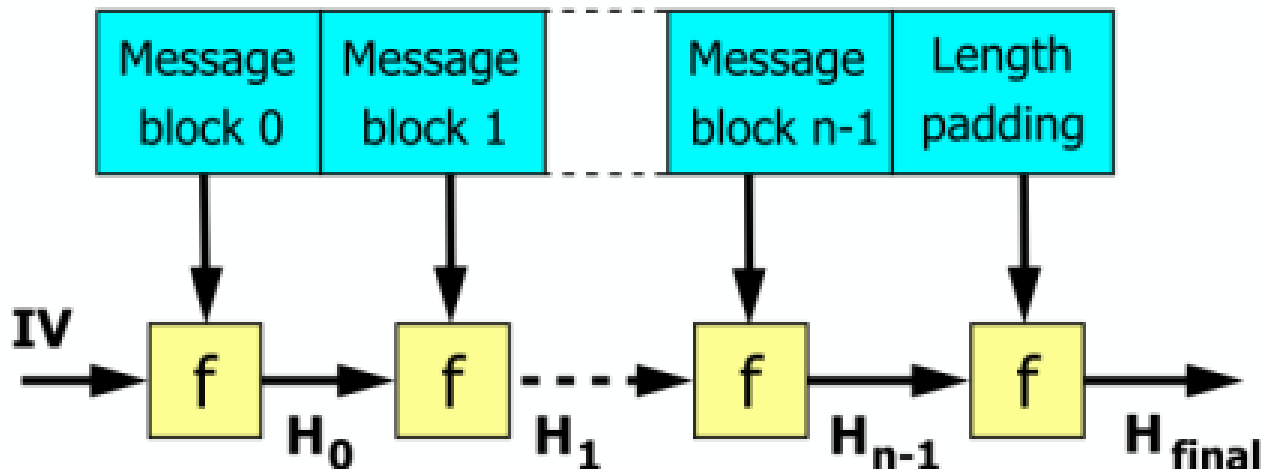


Les chiffrements symétriques usuels

- + RC4, clés d'au plus 2048 bits
 - Chiffrement par flux (octets)
- + 3xDES, avec 2 clés (112 bits)
 - Chiffrement de blocs de 64 bits
 - 2 clés K1, K2
 - $y = E(K1, D(K2, E(K1, x)))$, soit chiffrement avec K1, déchiffrement avec K2, et chiffrement avec K1
- + AES avec une clé 128 bits
 - Chiffrement de blocs de 128 bits
- + Le mode *Cipher Block Chaining*, CBC
 - $IV_0 = null$
 - $y_k = E(Key, IV_k \text{ exor } x_k)$
 - $IV_{k+1} = y_k$
- + CBC-MAC
 - Chiffrement en mode CBC
 - *On ajoute au message un ensemble d'octets (padding) de telle sorte que la longueur obtenue soit un multiple de la taille du bloc. Le CBC-MAC est le dernier bloc calculé*
 - ISO/IEC 9797
 - *Method 1, padding avec une suite d'octets nuls*
 - *Method 2, padding avec un premier octet 0x80, complété par une suite d'octets nuls*
 - *Method 3, ajout d'un entête comportant la longueur, une attaque existe*

- ✚ Une fonction d'empreinte (H) produit, à partir d'un message M une valeur pseudo aléatoire de p bits (soit 2^p empreintes). Les attaques sont classés en trois catégories
 - Collision: trouver un couple (M, M') tel que $H(M) = H(M')$
 - 🌐 En raison du paradoxe des deux anniversaires, la probabilité d'une collision est de $1/2^{p/2}$
 - 1st pre-image, étant donné X , trouver M tel que $H(M) = X$
 - 2nd pre-image, étant donné M , trouver M' tel que $H(M') = H(M)$
 - Dans le cas d'un algorithme parfait, la probabilité d'une collision est de $1/2^{p/2}$ essais et pour les *pre-image* $1/2^p$.
- ✚ Les fonctions de hash sont surjectives !

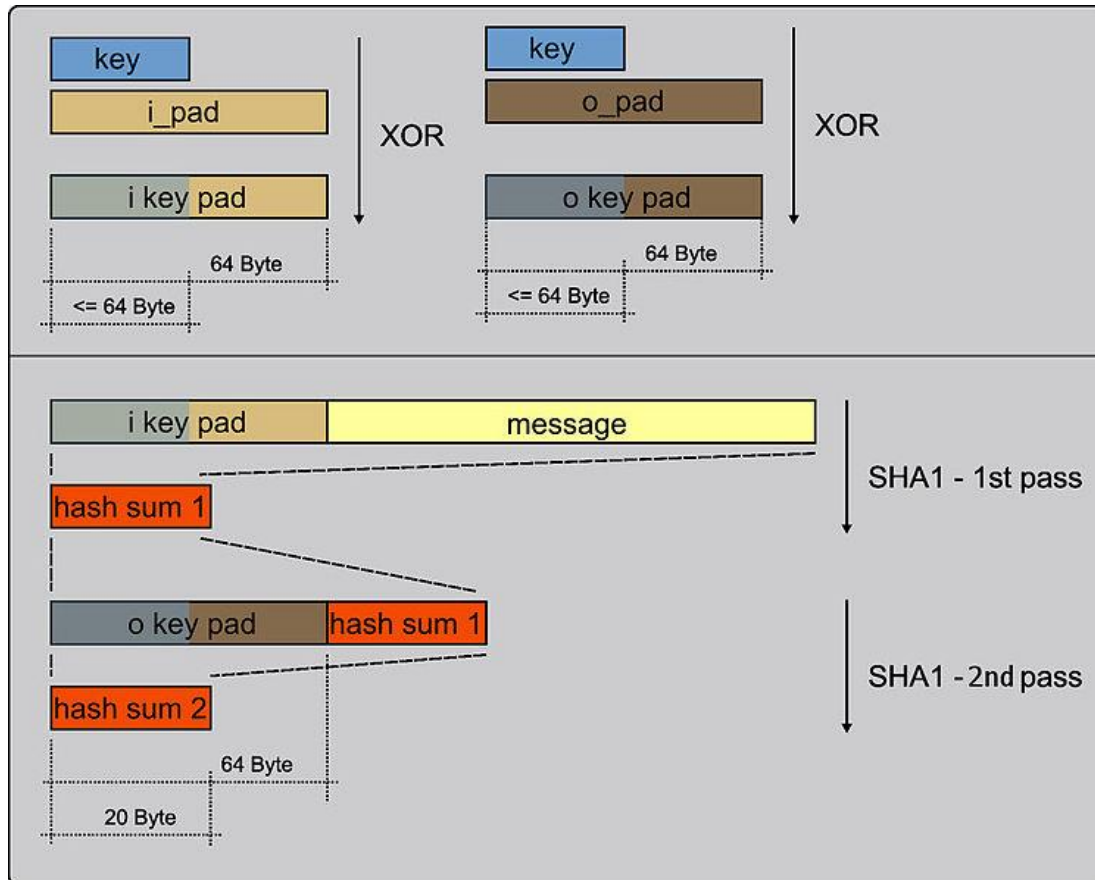
- ✚ Les fonctions MD5 et SHA1 sont construites selon le procédé dit Merkle-Damgård
 - $H_{i+1} = f(M_i, IV_i)$
 - $IV_{i+1} = H_{i+1}$
- ✚ SHA1 et MD5 utilisent des messages (blocs) de 512 bits
- ✚ La sortie des fonctions f est de 160 bits pour SHA1 et 128 bits pour MD5



Hash-based message authentication code

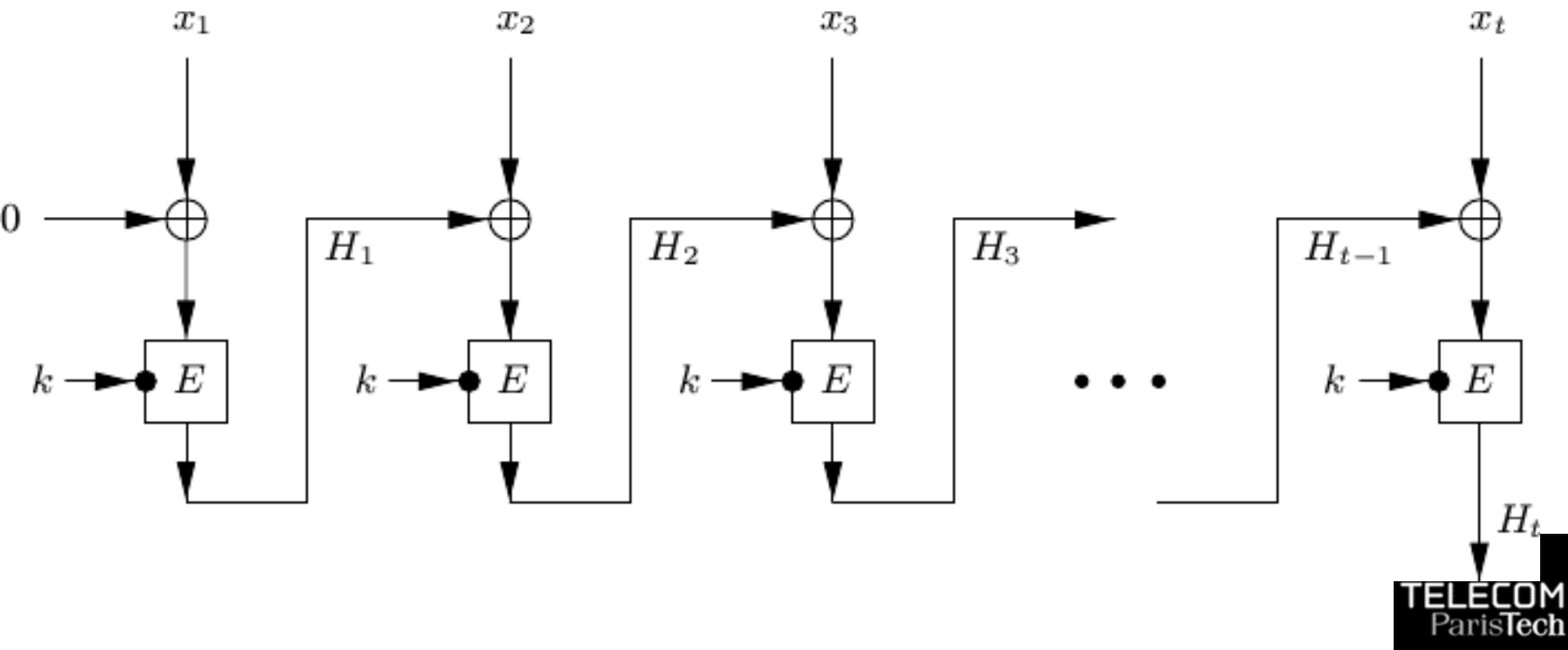
■ HMAC-MD5, HMAC-SHA1

$$\text{HMAC}(K, m) = H((K \oplus \text{opad}) \parallel H((K \oplus \text{ipad}) \parallel m))$$

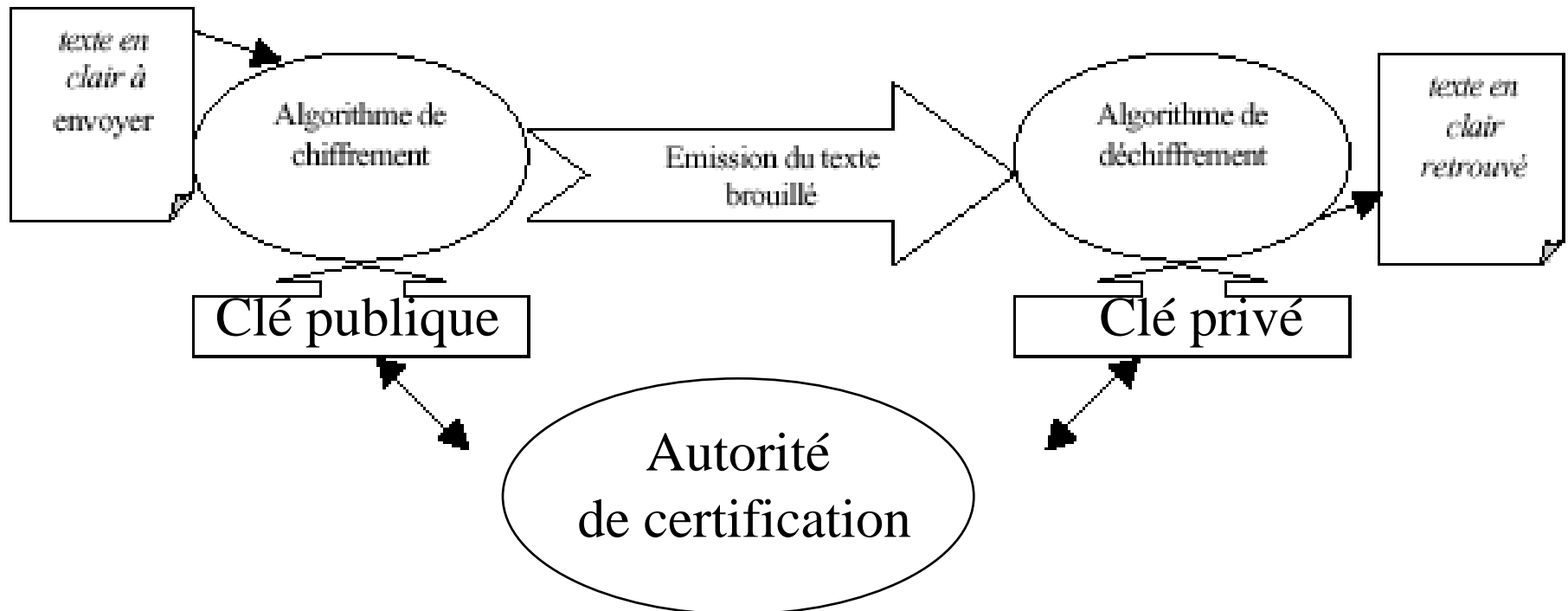


✚ Cipher Message Authentication Code

- $H_{i+1} = E_k(M_i, IV_i)$
- $IV_{i+1} = H_{i+1}$



Chiffrement Asymétrique



Au sujet des Groupes Abeliens finis

- ✚ Un groupe Abélien $(G, *)$ est un ensemble d'éléments tel que la loi $*$ pour cet ensemble soit:
 - définie pour tout couple (a, b) , $a * b \in G$
 - commutative, $a * b = b * a$
 - associative, $(a * b) * c = a * (b * c)$
 - possède un élément neutre $a * e = e * a = a$
 - et que possède un élément inverse unique, $a * a^{-1} = a^{-1} * a = e$
- ✚ Un groupe fini possède un nombre d'éléments fini.
- ✚ A l'aide du théorème de Bezout on démontre facilement que $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ avec p premier est un groupe pour la loi x
 - $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ représente l'ensemble des restes de la division d'un nombre z par l'entier p .
 - $z = r \pmod{p} \Leftrightarrow z = qp + r$



- ✚ Le nombre d'Euler $\varphi(n)$ est le nombre d'entiers premiers avec n
 - $\varphi(1)=1$
 - Pour p premier, $\varphi(p) = p-1$
 - Pour p et q premiers, $\varphi(p.q) = \varphi(p). \varphi(q)$
- ✚ Le nombre des entiers x tels que $\text{pgcd}(a,x)=1$ est égal à $\varphi(a)$
 - $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}^*, x)$ est le groupe des entiers inversible pour la loi x en modulo n
 - Le cardinal de ce groupe est égal à $\varphi(n)$

- ✚ Soit n un produit de deux nombres premiers $n = pq$
- ✚ Soit e un entier inversible modulo $\varphi(n)$, soit e premier avec $\varphi(n) = (q-1)(p-1)$
 - $\exists d$ tel que $e \cdot d = 1 \pmod{\varphi(n)}$.
 - (e, n) clé publique, chiffrement $C = M^e \pmod{n}$
 - (d, n) clé privée, déchiffrement $M = C^d \pmod{n}$
 - $M^{ed} = M \pmod{n}$
- ✚ **La sécurité des RSA repose sur la difficulté de factorisation d'un produit de nombre premiers.**
- ✚ La solution de $a \cdot x = 1 \pmod{n}$ peut être trouvée à l'aide d'un algorithme d'Euclide étendu.
 - Si, a et b ont un diviseur commun d ($a > b$) alors $a - kb$ est divisible par d .
 - On choisit le plus grand k tel que $a - kb = r$ ($r \geq 0$), soit $a = kb + r$.
 - Si $r=0$ alors a est divisible par b
 - Sinon on recommence l'algorithme avec b et r
 - Le PGCD est le dernier reste non nul.



L'algorithme d'Euclide RSA 2/3

- + Soit deux nombres a et b avec $a > b$
 - $a = bq + r$, $\text{pgcd}(a,b) = \text{pgcd}(a,r)$
- + L'algorithme d'Euclide réalise le calcul de $\text{pgcd}(a,b)$ en temps polynomial
- + Deux nombres sont premiers entre eux si et seulement si $\text{pgcd}(a,b) = 1$.
- + Le théorème de Bezout se démontre grâce à l'algorithme d'Euclide
 - Si a et b sont premiers entre eux il existe un couple unique d'entiers (u,v) tel que
 - $au + bv = 1$



✚ Exemple $a=522$, $b=453$

$$522=a, 453=b$$

$$522-453 = 69$$

$$453-6.69 = 39$$

$$69-39=30$$

$$39-30=9$$

$$30-3.9=3$$

$$3-3=0, 3 \text{ est le PGCD}(522,453)$$

✚ Exemple de calcul de clés RSA

$$p=47, q=59, n=pq = 2773, (p-1)(q-1)=2668$$

17 est premier avec $(p-1)(q-1)$

on cherche d $17d = 1 \pmod{2668}$

$\text{PGCD}(17,2668)=1$, $1 = a u + b v$, v est la solution

$$2668=au$$

$$17=bv$$

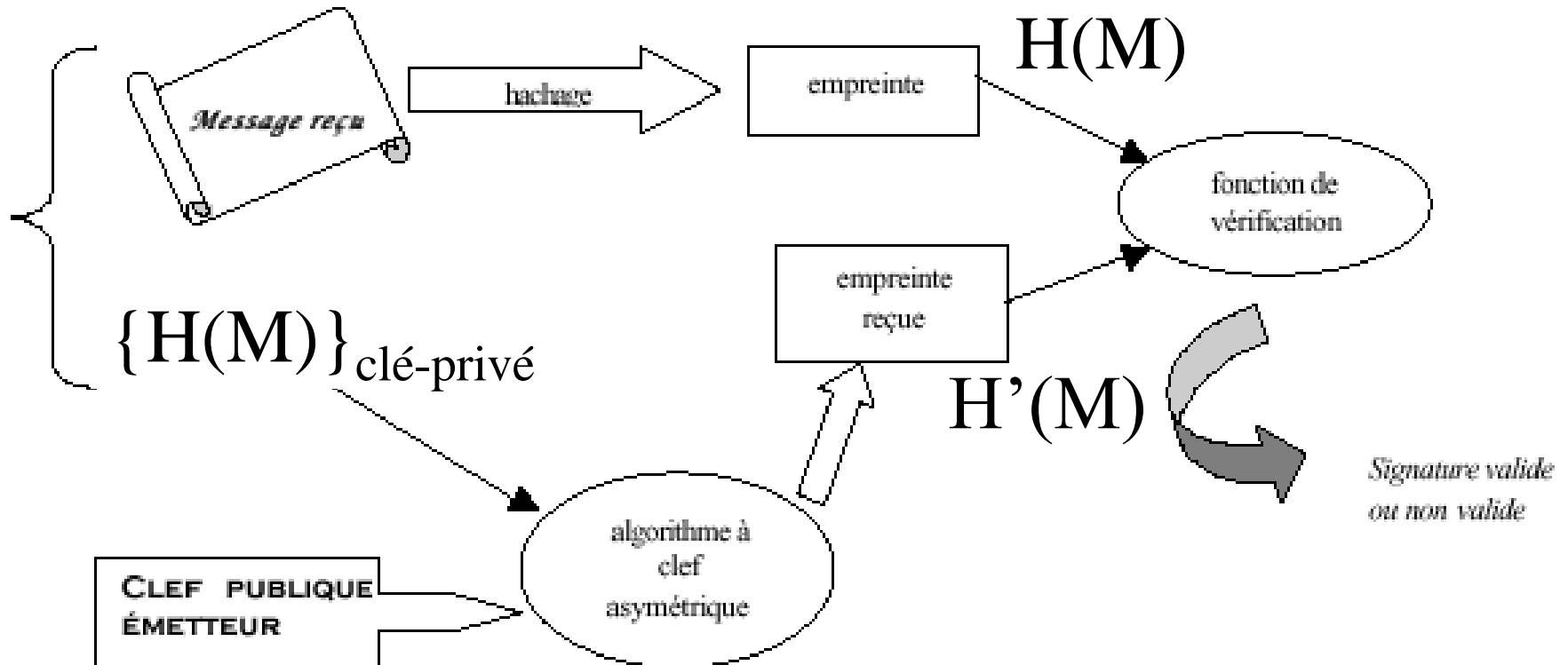
$$2668-156.17 = 2668 - 2652 = 16 = a - 156 b$$

$$17-16 = 1, b - (a - 156 b) = 1, 157 b - a = 1, \text{ d'ou } d = 157$$

Le padding RSA PKCS#1-v1_5 (RFC 3347)

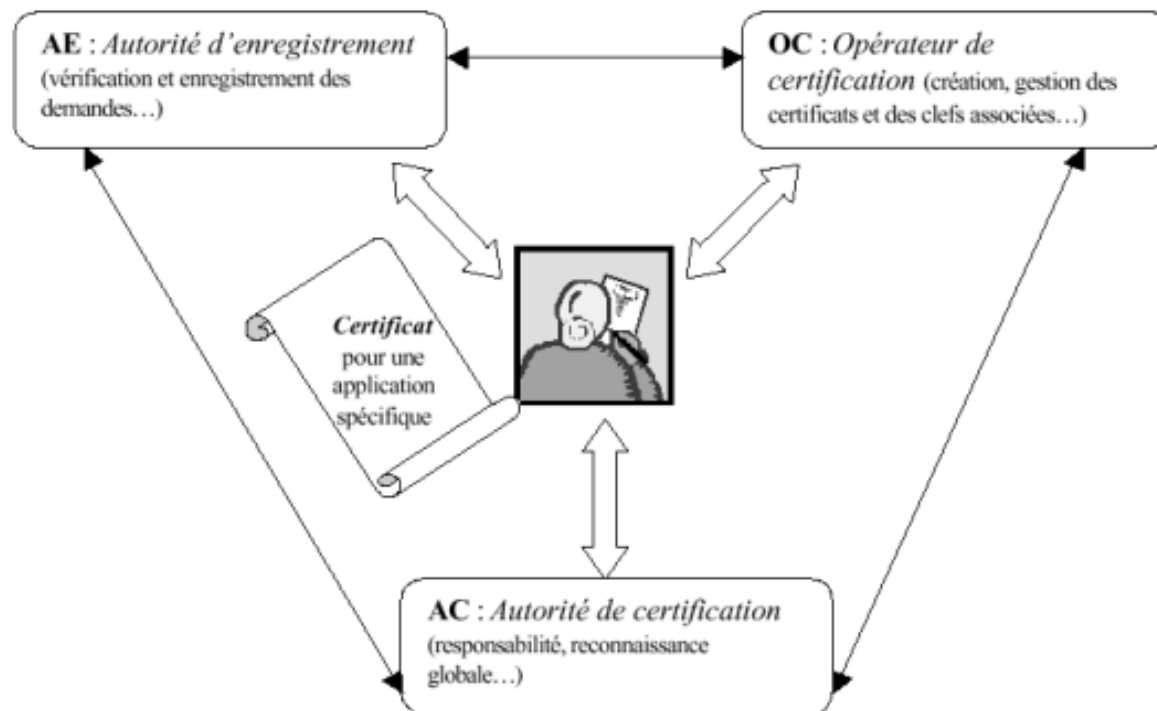
- ✚ Le padding est nécessaire pour la sécurité de RSA
 - Par exemple le chiffrement d'une même valeur x par trois clés RSA publiques $(3, n)$ permet de retrouver la valeur x
 - $y_1 = x^3 \bmod n_1, y_2 = x^3 \bmod n_2, y_3 = x^3 \bmod n_3$
 - Si n_1, n_2, n_3 sont premiers entre eux, le théorème du résidu chinois permet de construire $y = x^3 \bmod (n_1.n_2.n_3)$, puis de calculer la racine cubique de y égale à x (puisque $x < n_1, x < n_2, x < n_3$)
 - $n = n_1.n_2.n_3, q_i = (n/n_i)^{-1} \bmod n_i, y = \sum q_i y_i n/n_i \bmod n$
- ✚ Pour un chiffrement, $EM^e \bmod n, N$ octets
 - $EM = 0x00 || 0x02 || PS || 0x00 || M$
 - PS est un nombre aléatoire de taille $N - \text{longueur}(M) - 3$ octets
- ✚ Pour une signature, $EM^d \bmod n, N$ octets
 - $EM = 0x00 || 0x01 || PS || 0x00 || M$
 - PS est une série d'octets de taille $N - \text{longueur}(M) - 3$ octets dont la valeur est $0xFF$





$$\text{Signature} = \{H(M)\}_{\text{clé-privé}}$$

- ✚ C'est l'ensemble constitué par une suite de symboles (document *M*) et une signature.
- ✚ Le format de certificat le plus courant est X509 v2 ou v3. La syntaxe utilisée est l'ASN.1 (*Abstract Syntax Notation One*).



```
Certificate ::= SEQUENCE {
    tbsCertificate      TBSCertificate,
    signatureAlgorithm  AlgorithmIdentifier,
    signature           BIT STRING }
```

```
TBSCertificate ::= SEQUENCE {
    version             [0] EXPLICIT Version DEFAULT v1,
    serialNumber        CertificateSerialNumber,
    signature           AlgorithmIdentifier,
    issuer              Name,
    validity            Validity,
    subject             Name,
    subjectPublicKeyInfo SubjectPublicKeyInfo,
    issuerUniqueID      [1] IMPLICIT UniqueIdentifier OPTIONAL,
                       -- If present, version shall be v2 or v3
    subjectUniqueID    [2] IMPLICIT UniqueIdentifier OPTIONAL,
                       -- If present, version shall be v2 or v3
    extensions          [3] EXPLICIT Extensions OPTIONAL
                       -- If present, version shall be v3
}
```



Public Key Infrastructure

- ✚ Les principales fonctions réalisées par une architecture PKI pour la gestion des certificats se résument ainsi :
 - Enregistrement de demande et vérification des critères pour attribution d'un certificat.
 - L'identité du demandeur est vérifiée ainsi que le fait qu'il soit bien en possession de la clef privée associée
 - Création des certificats
 - Diffusion des certificats entraînant la publication des clefs publiques
 - Archivage des certificats pour assurer la sécurité et la pérennité
 - Renouvellement des certificats en fin de période de validité
 - Suspension de certificats.
 - Elle peut être utile si le propriétaire estime ne pas avoir besoin temporairement de son certificat ; cependant cette fonction n'est pas aisée à mettre en œuvre ; elle est essentiellement administrative et il n'existe pas de standard d'implémentation
 - Révocation de certificats.
 - Sur date de péremption, perte, vol ou compromission de clefs
 - Création et publication (au sens gestion) des listes de révocation des certificats
 - Il y aura révocation du certificat dans les cas suivants : date de fin de validité atteinte, clef privée divulguée, perdue (donc impossibilité de lire les objets rendus confidentiels) ou compromise.
 - Délégation de pouvoir à d'autres entités reconnues de confiance.
 - Toute communauté peut créer sa propre infrastructure PKI, dans ce cas une étude de faisabilité est nécessaire en s'appuyant sur de nombreux critères.



- ✚ PKCS « *Public-Key Cryptography Standards* » est un ensemble de standards pour la mise en place des IGC, coordonné par RSA ; ces standards définissent les formats des éléments de cryptographie :
 - PKCS#1 : RSA Cryptography Specifications Version 2 (*RFC 2437*)
 - PKCS#2 : inclus dans PKCS#1
 - PKCS#3 : Diffie-Hellman Key Agreement Standard Version 1.4
 - PKCS#4 : inclus dans PKCS#1
 - PKCS#5 : Password-Based Cryptography Standard Version 2
 - PKCS#6 : Extended-Certificate Syntax Standard Version 1.5
 - PKCS#7 : Cryptographic Message Syntax Standard Version 1.5 (*RFC2315*)
 - PKCS#8 : Private-Key Information Syntax Standard Version 1.2
 - PKCS#9 : Selected Attribute Types Version 2.0
 - PKCS#10 : Certification Request Syntax Version 1.7 or Certificate Signing Request (CSR) (*RFC 2314*)
 - PKCS#11 : Cryptographic Token Interface Standard Version 2.10
 - PKCS#12 : Personal Information Exchange Syntax Standard Version 1.0
 - PKCS#13 : Elliptic Curve Cryptography Standard Version 1.0
 - PKCS#14 : Pseudorandom Number Generation Standard Version 1.0
 - PKCS#15 : Cryptographic Token Information Format Standard Version 1.1

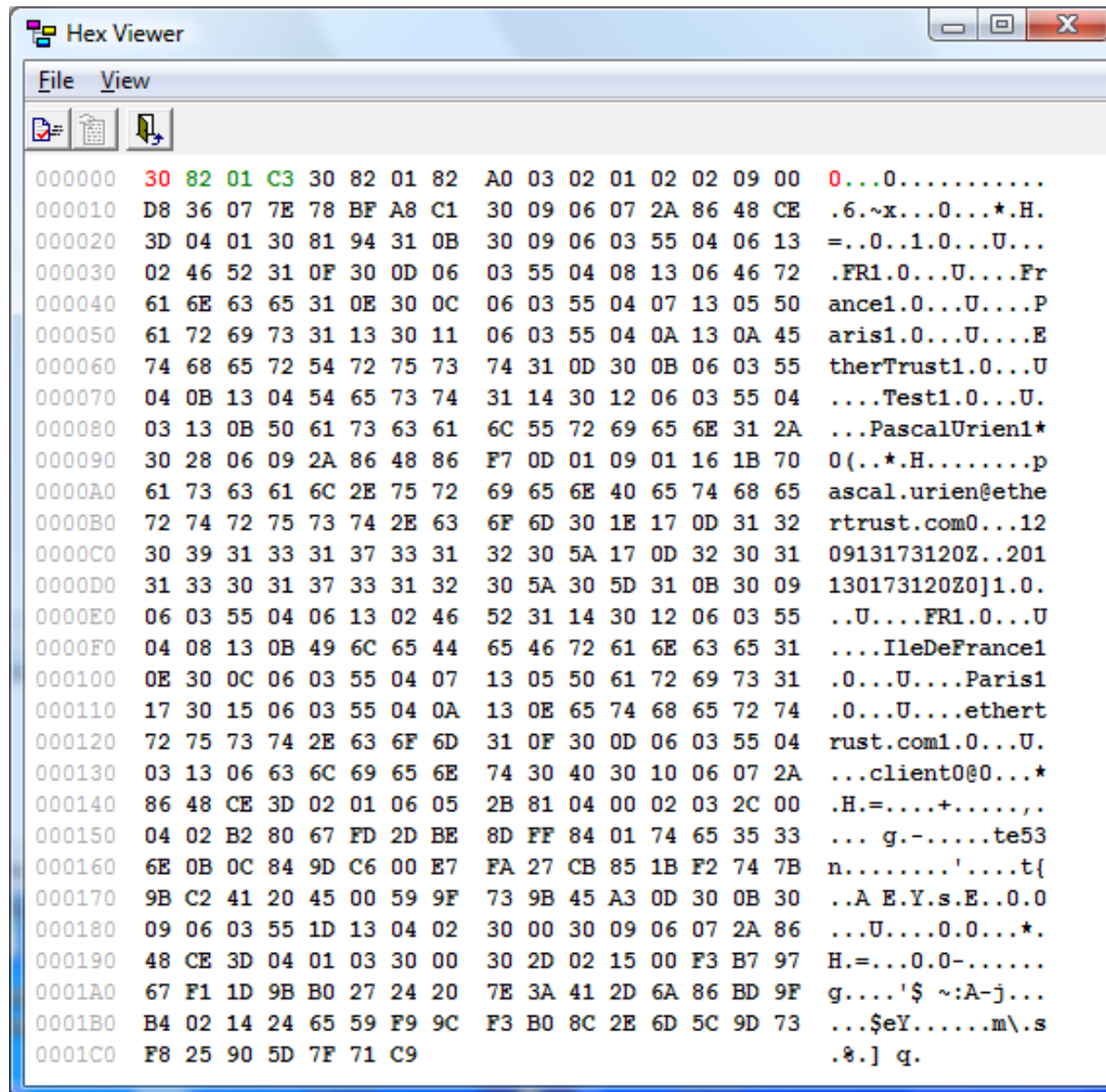


Un certificat X509 RSA

```
Hex Viewer
File View
000000 30 82 02 37 30 82 01 A0 A0 03 02 01 02 02 02 00 0..70.....
000010 FB 30 0D 06 09 2A 86 48 86 F7 0D 01 01 05 05 00 .0...*.H.....
000020 30 81 84 31 0B 30 09 06 03 55 04 06 13 02 46 52 0..1.0...U...FR
000030 31 0B 30 09 06 03 55 04 08 13 02 37 35 31 0E 30 1.0...U...751.0
000040 0C 06 03 55 04 07 13 05 50 61 72 69 73 31 0D 30 ...U...Paris1.0
000050 0B 06 03 55 04 0A 13 04 45 4E 53 54 31 0F 30 0D ...U...ENST1.0.
000060 06 03 55 04 0B 13 06 49 6E 66 72 65 73 31 12 30 ..U...Infres1.0
000070 10 06 03 55 04 03 13 09 49 6E 66 72 61 64 69 6F ...U...Infradio
000080 31 31 24 30 22 06 09 2A 86 48 86 F7 0D 01 09 01 11$0"...*.H.....
000090 16 15 72 6F 6F 74 40 69 6E 66 72 61 64 69 6F 2E ..root@infradio.
0000A0 65 6E 73 74 2E 66 72 30 1E 17 0D 30 36 30 39 30 enst.fr0...06090
0000B0 31 30 39 34 38 31 39 5A 17 0D 30 39 31 32 31 34 1094819Z..091214
0000C0 30 39 34 38 31 39 5A 30 24 31 22 30 20 06 03 55 094819Z0$1"0 ..U
0000D0 04 03 14 19 70 75 72 69 65 6E 31 40 69 6E 66 72 ...purien1@infr
0000E0 61 64 69 6F 31 2E 65 6E 73 74 2E 66 72 30 81 9F adio1.enst.fr0..
0000F0 30 0D 06 09 2A 86 48 86 F7 0D 01 01 01 05 00 03 0...*.H.....
000100 81 8D 00 30 81 89 02 81 81 00 BF F4 CE FC 83 44 ...0.....D
000110 03 DD 1F E2 30 5C 4D 6D E6 E7 41 EF 58 CF 94 46 ...0\Mm..A.X..F
000120 05 B5 76 A5 16 62 6E 15 11 CD 12 B6 35 7D 5F F2 ..v..bn.....5}_
000130 31 BB 3E 43 39 1F 02 F9 A8 B1 CC 25 D5 81 07 9D 1.>C9.....&....
000140 29 12 D7 6B 49 B6 E1 FC 4F EA 63 B9 D1 36 5C 98 )..kI...O.c..6\
000150 3B 52 0B 78 87 56 29 4A 84 B0 FD 12 F2 A2 7C 10 ;R.x.V)J.....|
000160 66 72 48 68 D3 07 8C 8A 77 C4 43 00 9B AD 88 AB frHh....w.C....
000170 02 EB 14 33 C9 47 B9 D1 CE 3E D7 77 82 B8 DF 12 ...3.G...>.w....
000180 27 25 4E 3F C7 3D 8E 8B 5C 71 02 03 01 00 01 A3 '%N?..=\q.....
000190 17 30 15 30 13 06 03 55 1D 25 04 0C 30 0A 06 08 .0.0...U.&..0...
0001A0 2B 06 01 05 05 07 03 02 30 0D 06 09 2A 86 48 86 +.....0...*.H.
0001B0 F7 0D 01 01 05 05 00 03 81 81 00 34 FC D5 7B 61 .....4..{a
0001C0 8C 08 C4 21 63 F8 B6 22 D7 2A E8 46 F9 16 40 0B ...!c..".*.F.ê.
0001D0 C8 06 AC D1 01 6B 13 2F 89 06 69 F2 ED 2F 3E 1F .....k./..i./>.
0001E0 E4 E3 FA 74 71 79 DD 31 6F D7 2F 73 CD 7C 0A BC ...tqy.lo./s.|..
0001F0 44 81 BD 6C 92 55 9D 52 A8 AC 58 3D BF 9B 16 10 D..1.U.R..X=....
000200 63 E7 A1 FA 3C 31 F8 C1 5A 8D CB 2E 58 66 2F 78 c...<1..Z...Xf/x
000210 85 2C 94 3E 83 6F 7A 81 A9 0E 87 0B C9 0C AE 71 .,.>.oz.....q
000220 2A 7E 68 34 CA F5 BA A4 DF 8C 03 58 C0 32 AA DF *~h4.....X.2..
000230 8B 6F E5 08 D0 93 C3 7D E5 F0 70 .o.....}.p
```



Un certificat X509 ECC



```
Hex Viewer
File View
000000 30 82 01 C3 30 82 01 82 A0 03 02 01 02 02 09 00 0...0.....
000010 D8 36 07 7E 78 BF A8 C1 30 09 06 07 2A 86 48 CE .6.~x...0...*.H.
000020 3D 04 01 30 81 94 31 0B 30 09 06 03 55 04 06 13 =..0...1.0...U...
000030 02 46 52 31 0F 30 0D 06 03 55 04 08 13 06 46 72 .FR1.0...U...Fr
000040 61 6E 63 65 31 0E 30 0C 06 03 55 04 07 13 05 50 ance1.0...U...P
000050 61 72 69 73 31 13 30 11 06 03 55 04 0A 13 0A 45 aris1.0...U...E
000060 74 68 65 72 54 72 75 73 74 31 0D 30 0B 06 03 55 therTrust1.0...U
000070 04 0B 13 04 54 65 73 74 31 14 30 12 06 03 55 04 ...Test1.0...U.
000080 03 13 0B 50 61 73 63 61 6C 55 72 69 65 6E 31 2A ...PascalUrien1*
000090 30 28 06 09 2A 86 48 86 F7 0D 01 09 01 16 1B 70 0(...*.H.....p
0000A0 61 73 63 61 6C 2E 75 72 69 65 6E 40 65 74 68 65 ascal.urien@ethe
0000B0 72 74 72 75 73 74 2E 63 6F 6D 30 1E 17 0D 31 32 rtrust.com0...12
0000C0 30 39 31 33 31 37 33 31 32 30 5A 17 0D 32 30 31 0913173120Z..201
0000D0 31 33 30 31 37 33 31 32 30 5A 30 5D 31 0B 30 09 130173120Z0]1.0.
0000E0 06 03 55 04 06 13 02 46 52 31 14 30 12 06 03 55 ..U...FR1.0...U
0000F0 04 08 13 0B 49 6C 65 44 65 46 72 61 6E 63 65 31 ...IleDeFrance1
000100 0E 30 0C 06 03 55 04 07 13 05 50 61 72 69 73 31 .0...U...Paris1
000110 17 30 15 06 03 55 04 0A 13 0E 65 74 68 65 72 74 .0...U...ethert
000120 72 75 73 74 2E 63 6F 6D 31 0F 30 0D 06 03 55 04 rust.com1.0...U.
000130 03 13 06 63 6C 69 65 6E 74 30 40 30 10 06 07 2A ...client0@0...*.
000140 86 48 CE 3D 02 01 06 05 2B 81 04 00 02 03 2C 00 .H.=...+.....,
000150 04 02 B2 80 67 FD 2D BE 8D FF 84 01 74 65 35 33 ... g.-.....te53
000160 6E 0B 0C 84 9D C6 00 E7 FA 27 CB 85 1B F2 74 7B n.....'.....t{
000170 9B C2 41 20 45 00 59 9F 73 9B 45 A3 0D 30 0B 30 ..A E.Y.s.E..0.0
000180 09 06 03 55 1D 13 04 02 30 00 30 09 06 07 2A 86 ...U...0.0...*.
000190 48 CE 3D 04 01 03 30 00 30 2D 02 15 00 F3 B7 97 H.=...0.0-.....
0001A0 67 F1 1D 9B B0 27 24 20 7E 3A 41 2D 6A 86 BD 9F g....'$ ~:A-j...
0001B0 B4 02 14 24 65 59 F9 9C F3 B0 8C 2E 6D 5C 9D 73 ...$eY.....m\s
0001C0 F8 25 90 5D 7F 71 C9 .&.] q.
```



- ✚ Un générateur g de $(\mathbb{Z}^*/p\mathbb{Z}, \times)$, avec p premier
 - $\forall x \in [1, p-1] \exists i \in [1, p-1] g^i = x \pmod{p}$,
 - en particulier $g^{p-1} = 1$
- ✚ Il existe au moins un g , qui est premier avec $p-1$, soit au moins $\varphi(p-1)$ solutions.
- ✚ Exemple $p=5$, $g=3$, g est premier avec $(5-1=4)$
 - $g^1 = 1.3 = 3$
 - $g^2 = 3.3 = 4$
 - $g^3 = 4.3 = 2$
 - $g^4 = 2.3 = 1$



Sécurité de Diffie Hellman

- ✚ Dans $(\mathbb{Z}^*/p\mathbb{Z}, \times)$ avec p premier, g un générateur
 - Connaissant $y = g^x$, il est difficile de trouver x
 - C'est l'hypothèse de complexité du logarithme discret
- ✚ g^x est une clé publique
- ✚ x est une clé privée
- ✚ Exchange de Diffie Hellman
 - $g^{ab} = (g^a)^b = (g^b)^a$
 - Hypothèse de sécurité
 - 🌐 Connaissant g^a et g^b il est difficile de trouver g^{ab}



Plus loin avec les Groupes finis

- ✚ (G, x) un groupe fini, cardinal $G = |G|$
- ✚ L'ordre d'un élément g ($g \in G$) est le plus petit entier e tel que $g^e = 1$
- ✚ H est un sous groupe de G si
 - H est inclus dans G
 - (H, x) est un groupe
- ✚ Soit g un élément de G , l'ensemble $\langle g \rangle = \{g^k : k \in \mathbb{Z}\}$ est un sous groupe de G
 - C'est le groupe engendré par g
 - Son cardinal est égal à l'ordre g
- ✚ $G = \langle g \rangle$ pour un certain g on dit que G est un groupe cyclique
- ✚ Si G est fini et cyclique il existe exactement $\varphi(|G|)$ générateurs de G .
- ✚ **Théorème de Lagrange**
 - Si G est un groupe fini le cardinal (ou l'ordre) de chaque sous groupe divise le cardinal de G
 - L'entier $|G| / |H|$ s'appelle l'indice de H dans G (*cofactor*)
- ✚ **Théorème de Sylow**
 - G un groupe fini. Pour tout nombre premier p et tout nombre entier r tel que p^r divise l'ordre de G , il existe un sous groupe de G d'ordre p^r .
- ✚ Si G est un groupe, et $g \in G$, $g^{|G|} = 1$
- ✚ On en déduit le petit théorème de Fermat,
 - si $\text{pgcd}(a, m) = 1$, alors $a^{\varphi(m)} = 1 \pmod{m}$
 - En particulier $a^{\varphi(m)-1} a = 1 \pmod{m}$, ce qui donne l'inverse de a en module m
 - $a^{-1} = a^{\varphi(m)-1} \pmod{m}$

Comprendre le théorème de Sylow dans $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +)$

- ✚ Dans $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +)$ la solution (x) de $ax=b$ (a, b étant connu) n'est pas une procédure complexe
 - une solution existe si $\text{pgcd}(a,p)$ divise b
- ✚ L'ordre r d'un élément a (tel que $ar=0$) s'obtient par la relation
 - $\text{ordre}(a) = \text{ppcm}(a,p) / p = a \times / \text{pgcd}(a,p)$
 - En particulier lorsque a est premier avec p , $\text{ordre}(a)=p$
- ✚ Exemple dans $(\mathbb{Z}/36\mathbb{Z}, +)$, $36 = 2^2 \times 3^2$
 - Les ordres possibles sont 2,4,3,9,6,12,18,36



- ✚ Un corps K est un ensemble d'éléments munis de deux lois notées $+$ et \times , tel que
 - $(K, +)$ est un groupe abélien, élément neutre e
 - (K^*, \times) est un groupe abélien, K^* représente l'ensemble K sans le neutre e , élément neutre 1
 - Distributivité de la deuxième loi (\times) sur la première ($+$)
 - $a \times (b + c) = ab + ac$
- ✚ L'intérêt des corps est d'obtenir des propriétés algébriques permettant :
 - La solution de systèmes d'équations linéaires
 - La définition de polynômes
- ✚ $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +, \times)$ avec p premier est un corps fini.

Les polynômes

- ✚ Dans un corps K on peut définir des polynômes P , de degré p
 - $P(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_p x^p$
 - $(P, +, \cdot)$ est un anneau
- ✚ Soit P un polynôme de degré p et Q un polynôme de degré q , $p \geq q$, on définit la division de P par Q
 - $P = Q A + R$, le couple (A, R) de polynômes est unique, et $\text{degré}(R) < q$.
- ✚ P est divisible par Q si et seulement ($\text{deg } P \geq \text{deg } Q$) et si le reste de la division de P par Q est nul.
- ✚ L'algorithme d'Euclide s'applique aux polynômes, et permet de calculer le pgcd de deux polynômes.
- ✚ Deux polynômes P et Q sont étrangers si et seulement si $\text{pgcd}(P, Q)$ est un polynôme de degré 0.
- ✚ Le théorème de Bezout s'applique aux polynômes étrangers
 - Si P et Q sont étrangers, il existe un couple unique (U, V) de polynômes étrangers, tels que, $P.U + Q.V = 1$



- ✚ **Théorème:** Soit p un nombre premier et $l(X)$ un polynôme irréductible de degré $n \geq 1$ dans $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}[X]$.
 - Alors $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}[X])/l$ (l'ensemble des restes des divisions par $l(X)$) est un corps.
 - Il possède p^n éléments et il ne dépend pas de l (seulement du degré de l).
 - Ce corps est appelé corps de Galois à p^n éléments, noté $CG(p^n)$ (ou $GF(p^n)$ en anglais).
- ✚ **Théorème:** Les seuls corps finis qui existent sont les corps de Galois.

✚ Dans un corps K (fini) F_q ,

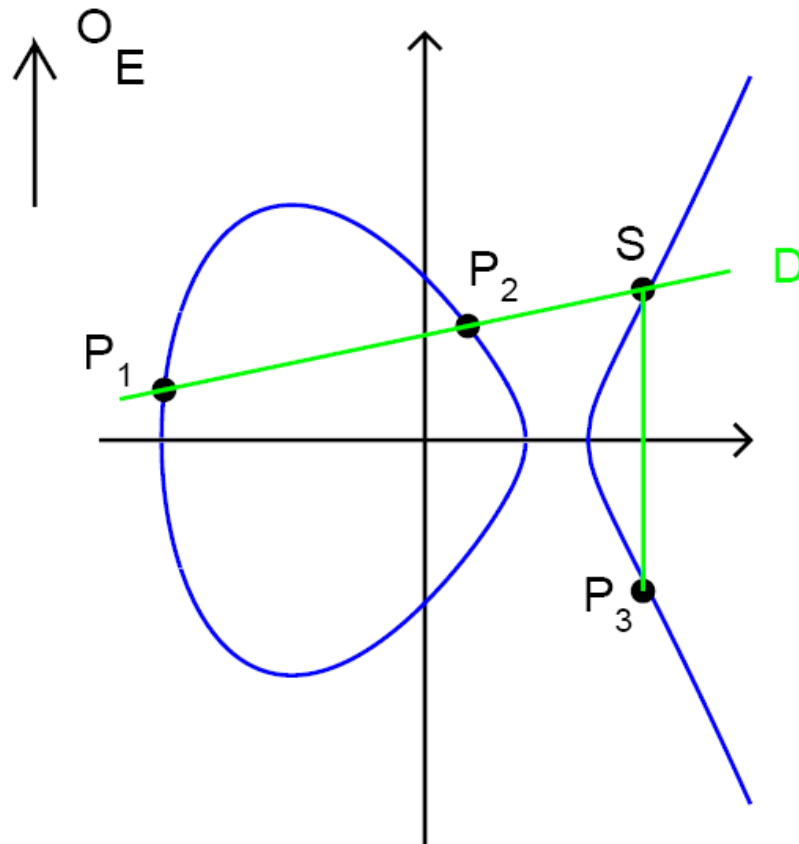
- $q=p^m$ ou $q=p$, avec p premier, p étant différent de 2 ou 3 (la caractéristique du corps est différente de 2 ou 3)
- $x, y, a, b \in K$, $y^2 = x^3 + ax + b$
- $\Delta = 4a^3 + 27b^2 \neq 0$

✚ $ECC(F_q, a, b) = \{ P(x, y) : y^2 = x^3 + ax + b \} \cup \{ O \}$

- $O =$ Point à l'infini
- Pour tout P on impose, $P+O = O+P = O$
- Pour $P(x, y) \neq O$, on définit $-P=(x, -y)$, et on pose $P + -P = O$

✚ Pour $p=2$

- $ECC(F_{2^m}, a, b) = \{ P(x, y) : y^2 + xy = x^3 + ax^2 + b \} \cup \{ O \}$



- ✚ Soit deux points P_1 et P_2 de la courbe
 - Si $P_1=O$ ou $P_2=O$, $P_1+P_2=O$
 - Sinon si $P_1= -P_2$ ou $P_2=-P_1$, $P_1+P_2 = O$
 - Sinon, $P_3(x_3,y_3)=P_1(x_1,y_1)+P_2(x_2,y_2)$

$$x_3 = \begin{cases} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)^2 - x_1 - x_2 & \text{si } P_1 \neq P_2 \\ \left(\frac{3x_1^2 + a}{2y_1} \right)^2 - 2x_1 & \text{si } P_1 = P_2 \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x_1 - x_3) - y_1 & \text{si } P_1 \neq P_2 \\ \frac{3x_1^2 + a}{2y_1} (x_1 - x_3) - y_1 & \text{si } P_1 = P_2 \end{cases}$$



Groupe d'une courbe elliptique

- ✚ L'ensemble des points (x,y) de F_q , de la courbe elliptique forme un groupe $E(F_q)$ dont le cardinal est noté $\#E(F_q)$
- ✚ Théorème de Hasse

$$q + 1 - 2\sqrt{q} \leq \#E(\mathbb{F}_q) \leq q + 1 + 2\sqrt{q}$$

- ✚ Un point de $E(F_q)$ est représenté par $\log_2 q + 1$ bits
 - $\log_2 q$ bits pour x
 - 1 bit pour le choix de y



Morphisme de Frobenius

✚ Dans un corps fini F_q ($q=p^n$) de caractéristique p , la fonction

■ $F(X) = X^p$

■ Est :

● linéaire $(X+Y)^p = X^p + Y^p$,

● bijective

✚ Autrement dit on peut toujours établir un isomorphisme entre des polynômes de degré k (défini dans F_q) et un sous ensemble de polynômes de degré kn



Avantage des Courbes Elliptiques

security (bits)	block cipher	E/\mathbb{F}_p	E/\mathbb{F}_{2^m}	RSA
112	3-DES	224	233	2048
128	AES small	256	283	3072
192	AES medium	384	409	8192
256	AES large	512	571	14720



Diffie Hellman pour ECC

- ✚ G un sous groupe de $ECC(F_q, a, b)$
- ✚ G est cyclique d'ordre n, $G = \langle P \rangle$, le point P est un générateur de G
- ✚ En notation additive
 - $aP = P + P + \dots + P$
 - $bP = P + P + \dots + P$
 - Secret partagé Diffie Hellman
 - 🌐 $DH = a(bP) = b(aP) = abP$



- + G un sous groupe de $ECC(F_p)$
- + $\#ECC = n = \text{index} \cdot q = \text{cofactor} \cdot \text{order}$
 - G est cyclique d'ordre premier q , $G = \langle P \rangle$, le point P est un générateur de G
- + La clé privé est $a \in [0, q-1]$, on calcule aP (clé publique)
- + La clé éphémère est $k \in [0, q-1]$, on calcule kP
- + On note $kP = (u, v)$, $x = u \bmod q$
- + La signature d'un message m , est le couple (x, y)
 - $x = u \bmod q$ (ou entier r)
 - $y = k^{-1}(H(m) + ax) \bmod q$ (la signature s)
 - La fonction H est généralement sha1
- + L'opération de vérification s'écrit
 - $i = (H(m)y^{-1}P + xy^{-1}(aP)) \bmod q$
 - $x = i \bmod q$?
- + Clé privé (P, q, a, k) , Clé publique (P, q, aP)
- + RFC 3278
 - "Use of Elliptic Curve Cryptography (ECC) Algorithms in Cryptographic Message Syntax (CMS)"
 - $ECDSA\text{-Sig-Value} ::= \text{SEQUENCE} \{ r \text{ INTEGER}, s \text{ INTEGER} \}$



Quelques normes utiles

+ Norme ANSI X9.62

- Représentation d'un point au format compressé ou non compressé
- Exemple, $N = \log_{256} q$ (pour un corps F_q)
 - Type, 1 octet (04=uncompressed, 03=compressed)
 - Valeur de x (N octets), Valeur de y (N octets)

+ IEEE Std 1363

- "IEEE Standard Specifications for Public-Key Cryptography"
- Terminologie pour les courbes elliptiques
- Key Agreement (DH), DL/ECKAS-DH1
 - Sha1(x|y), x N octets, y N octets, $N = \log_{256} q$ (pour un corps F_q)

+ SEC 2

- "Recommended Elliptic Curve Domain Parameters, Certicom Research"
- Recommandation de courbes elliptiques particulières

+ FIPS PUB 186-2

- DIGITAL SIGNATURE STANDARD (DSS)
- "Recommandation de courbes elliptiques particulières"

+ RFC 3278

- "Use of Elliptic Curve Cryptography (ECC) Algorithms in Cryptographic Message Syntax (CMS)"

Exemple Courbe Certicom sect13r1

- + Dans F_{2^m} , avec $m=113$, représentation des coordonnées (x,y) 15 octets
- + Courbe: $y^2 + xy = x^3 + ax^2 + b$
 - $a= 003088250CA6E7C7FE649CE85820F7$
 - $b= 00E8BEE4D3E2260744188BE0E9C723$
- + Polynôme générateur: $x^{113}+x^9 + 1$
 - $02000000000000000000000000000201$
- + Générateur (forme non compressée)
 - $04\ 009D73616F35F4AB1407D73562C10F\ 00A52830277958EE84D1315ED31886$
- + Ordre
 - $01000000000000000D9CCEC8A39E56F$
- + Cofacteur
 - 2
- + Exemple de clé
 - Privé $a= 000D2634C36BDE27916D7C590136CD$
 - Publique $aP= 04\ 01A352487A98884A2A35EEDBB4A93B\ 0052525EFAC8DA9B62A56D40BBCBEE$
- + Exemple de signature ECCDSA
 - $30\ 22$
 - $02\ 0F\ 0020634AAF9F9B385A6CD10086377E$ (r)
 - $02\ 0F\ 00E6855729E55AAB86D69CE2646415$ (s)
- + Exemple de calcul ECCDH (Sha1(x|y))
 - 20 octets: $82461C62A3BC762DF2F3270BDD6DC9CC58FD9E17$

- ✚ Soit G_1 , G_2 , et G_r des groupes finis d'ordre r , avec r premier
- ✚ Un pairage bilinéaire e (*bilinear pairing*, *bilinear map*) est une fonction telle que
 - $e: G_1 \times G_2 \rightarrow G_r$
 - e est non dégénérée, $e(P, Q) \neq 1$
 - e est bilinéaire $e(aP, bQ) = e(P, Q)^{ab}$



- ✚ **$E(K)$ une courbe elliptique définie sur un corps K (F_p), de caractéristique q ($p=q^m$)**
 - Les points de E peuvent être définis (il existe un isomorphisme) sur des corps plus grands F_{q^k} , ou encore la clôture algébrique de K .
- ✚ **Pour r entier, le sous groupe de points de r -torsion, défini pour une courbe elliptique E sur un corps K , est noté**
 - $E(K)[r] = \{ P \in E \mid rP = O \}$
 - Pour r premier avec q (soit $\text{pgcd}(r, q) = 1$)
 - $E(K)[r]$ est isomorphe à $Z/rZ \times Z/rZ$
 - $E(K)[r]$ contient r^2 points
- ✚ **Si r divise $p-1$ ($q^m - 1$), le corps K (F_p) contient les racines $r^{\text{ième}}$ de l'unité**



- ✚ Soit $E(K)$ une courbe elliptique définie sur un corps K (\mathbb{F}_p), avec $p = q^m$
- ✚ Soit G un sous groupe cyclique de $E(K)$
 - Il existe k tel que G soit isomorphe à un sous groupe de \mathbb{F}_{p^k}
 - La plus petite valeur de k est appelé le *embedding degree*.
 - 🌐 Soit n le cardinal de G ($\#G$)
 - 🌐 n divise $p^k - 1$, $n \mid p^k - 1$
- ✚ De manière équivalente k est le plus petit entier, tel que \mathbb{F}_{p^k} contienne le groupe μ_n des racines $n^{\text{ième}}$ de l'unité dans \mathbb{F}_p



✚ Couplage de Weil

- Corps $K = \mathbb{F}_q$
- $e: E(K) [r] \times E(K) [r] \rightarrow U_m$
 - $e(aP, bQ) = e(P, Q)^{ab}$
- U_m est le groupe des racines $r^{\text{ième}}$ de l'unité dans \mathbb{F}_{q^k}
 - $U_m = \{ x \in \mathbb{F}_{q^k} \mid x^r = 1 \}$
 - r divise le cardinal de $E(K)$ ($\# E(K)$)
 - r divise $q^k - 1$
- Le premier algorithme de couplage de Weil a été proposé en 1986 par *V. Miller*, "Short Programs for Functions on Curves"



Exemple de couplage de Weil

- ✚ ECC(Fq): $y^2 = x^3 + x$, corps Fq, q premier avec $q \equiv 3 \pmod{4}$
- ✚ G1 est un sous groupe de ECC(Fq), G2 est un sous groupe de Fq^2
- ✚ Il y a $q+1$ points sur la courbe $\#ECC(Fq) = q+1$
- ✚ $r =$ ordre de G1 = facteur premier de $q+1$
- ✚ $h =$ cofactor = $\#ECC(Fq) / r$
 - r divise $q+1$
 - r divise $q^2 - 1$ puisque $q^2 - 1 = (q-1)(q+1)$
- ✚ $q=878071079966331252243778198475404981580688319941420821$
 $10286533992664756308802229570786251794226622214231558587$
 $69582317459277713367317481324925129998224791.$
- ✚ $h=120160122648911460793888213667405342048029544012513118$
 $22919615131047207289359704531102844802183906537786776$
- ✚ $r=730750818665451621361119245571504901405976559617$
- ✚ Generator P=
 $76421393279579038516614615648462818571073824613673122359$
 $46073058631971489041073352307528669532329195100981565579$
 $913888772511132258440513969390781514106884,$
 $84105312616680306414534916370623751316795167176374479599$
 $09430272303540982487029510199580486858497294948186129644$
 $515630634339691266774480234634049031935396$



Example Couplage de Weil

✚ a = 321231739573260508064943282038854866624801566274

✚ aP =
301901600464207748384853072909292823401500311348346356764859754747703
064669197258898445749044213480292759568257999990157011471277891932048
3502179821202747,
622130912004388536645426112375868421081814378272661695953772580311048
821974186212677634483766383564352093956376894422864585155448402243584
2060112859040085

✚ b = 591069617759232948334516538341133684003963967541

✚ bP = 489872625336582550697622917901310968712983470168986006826993590244144
534124000070208650497397931419729729097601618783404569928023315742260
1733989063260044,
715768020641988338757762409522925702707172363082968385844449919698450
610626853008028585471746136204506517503675925750751323255279155813951
061482849469617

✚ c = 332790059747456431829511198714114673843901104395

✚ cP = 361673235446634950587227148388584900737947568189969047494313829915613
165227389313929815513580932571550613336307696480151992816947356553291
3077259306029100,
591927063716469042674124332635453987072498361375371305395310139261168
079986151403557597760872949800149313292665777504365718007945299529892
7247712148590792

✚ S = f(aP, bP)^c = f(bP, cP)^a = f(cP, aP)^b =
411874021818983935494518378468671897765968395058497750231537284872046
634607045530820852050427874577949368791925702115715036551400857093954
2202145179250626,
792272713616191570585463230096947246676587164343554480144379956667402
825333387256294430771484207666103108581680992251414596583914923441539
9681428439428268



- ✚ E une courbe elliptique sur un corps K (F_p), de caractéristique q ($p = q^m$)
- ✚ $E(K)[r]$ un groupe de r -torsion avec r premier avec q
- ✚ Soit k le plus petit entier tel que r divise p^{k-1}
 - k est le « embedding degree » de la courbe elliptique E relativement à r
- ✚ $e: E(F_p)[r] \times E(F_{p^k})[r] \rightarrow U_m$
 - U_m est le groupe des racines r ième de l'unité dans F_{p^k}
 - 🌐 $U_m = \{ x \in F_{p^k} \mid x^r = 1 \}$
- ✚ $e(aP, bQ) = e(P, Q)^{ab}$

Quelques Applications Emergentes



DH Tripartie

- Trois clés publiques aP , bP , cP
- Trois clés privées a, b, c
- $e(aP, bP)^c = e(bP, cP)^a = e(aP, cP)^b = e(P, P)^{abc}$



IBE (Identity Based Encryption) version de base

- P un point d'ordre r
- Clé maitre (privée) $s \in [0, r-1]$
- $h: \{\text{identités}\} \rightarrow \mathbb{Z}/r\mathbb{Z}$
- $h': \mathbb{F}_q^k \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$
- Clé publique sP
- Clé privée $ID, s.h(ID).P$
- r un nombre aléatoire dans $[0, r-1]$
- Chiffrement à l'aide de la clé publique sP , ID , et d'un nombre aléatoire r
 - $K = e(h(ID)P, sP)^r = e(P, P)^{s r h(ID)}$
 - Secret = $h'(K)$
 - $C = M \text{ exor Secret}$
- Transmission (rP, C)
- Déchiffrement à l'aide de la clé privée $s h(ID) P$
 - $K = e(s h(ID) P, rP) = e(P, P)^{s r h(ID)}$
 - Secret = $h'(K)$
 - $M = C \text{ exor S}$



Ciphertext-Policy Attribute-Based Encryption (CP-ABE)

- ✚ Une arbre d'accès (Access Tree, T) est un arbre constitué de nœuds réalisant les opérations booléennes ET ou OU. Les feuilles sont des attributs S_i
- ✚ On utilise un couplage bilinéaire (e) symétrique de $G_0 \times G_0 \rightarrow G_1$, d'ordre (G_0) premier p et de générateur g
- ✚ La clé publique PK est $G_0, g, h = g^B, f = g^{1/B}, e(g, g)^a$
- ✚ La clé maitre MK est (B, g^a)
- ✚ Le chiffrement d'un message M selon PK et T , est réalisé à l'aide d'un nombre aléatoire s choisit dans \mathbb{Z}_p et produit le chiffré CT (qui contient la valeur $M \cdot e(g, g)^{as}$ et un ensemble de paramètres)
- ✚ Chaque attribut S_i possède une clé privée SK_j générée à partir de MK.
- ✚ Le déchiffrement selon (CT, SK_j) permet d'obtenir le message M .

« Ciphertext-Policy Attribute-Based Encryption », John Bethencourt, Amit Sahai, Brent Waters, 2006



IPSEC

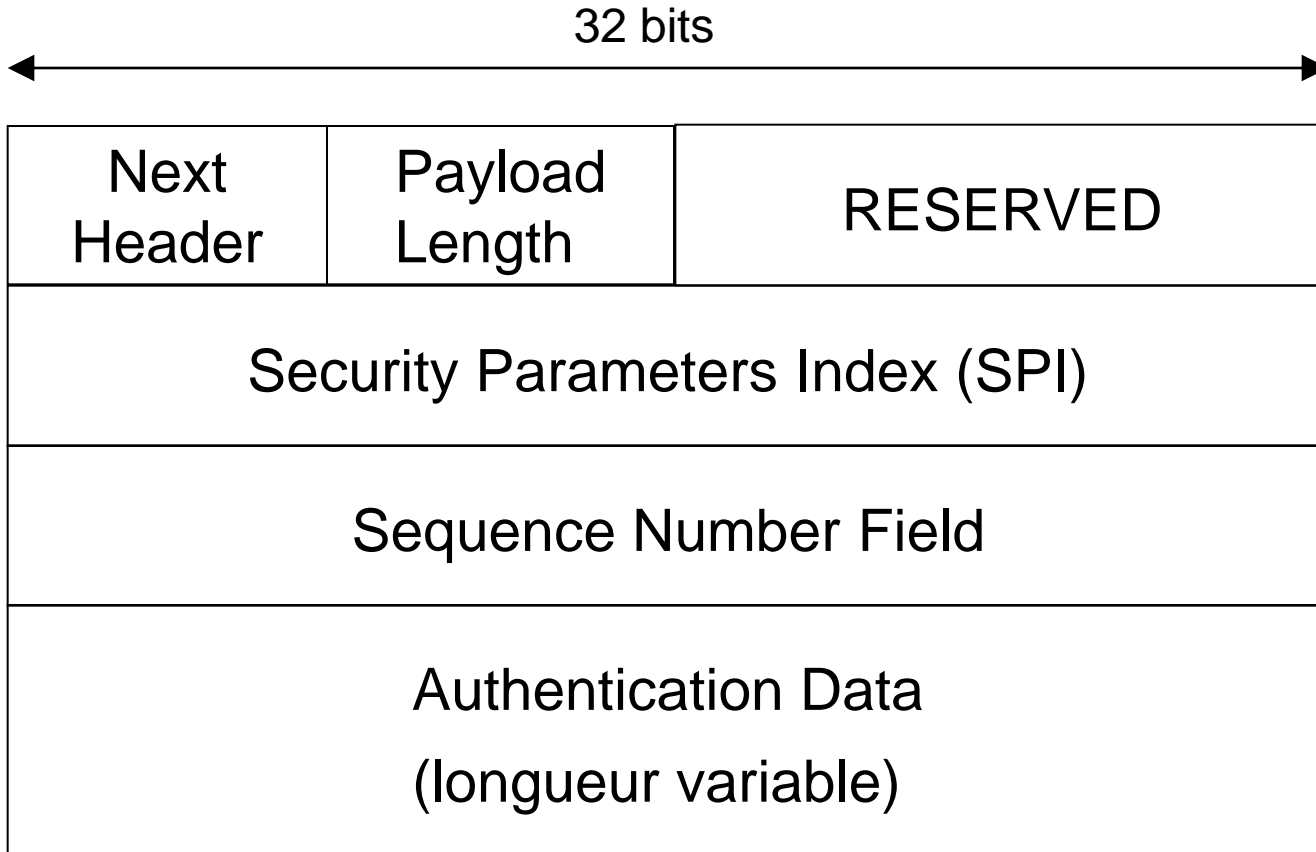
- ✚ Deux en têtes spécifiques sont utilisés, AH (IP Authentication Header) et ESP (IP Encapsulating Security Payload).
- ✚ AH garantit l'intégrité et l'authentification des datagrammes IP, mais n'assure pas la confidentialité des données.
- ✚ ESP est utilisé pour fournir l'intégrité, l'authentification et la confidentialité des datagrammes IP.



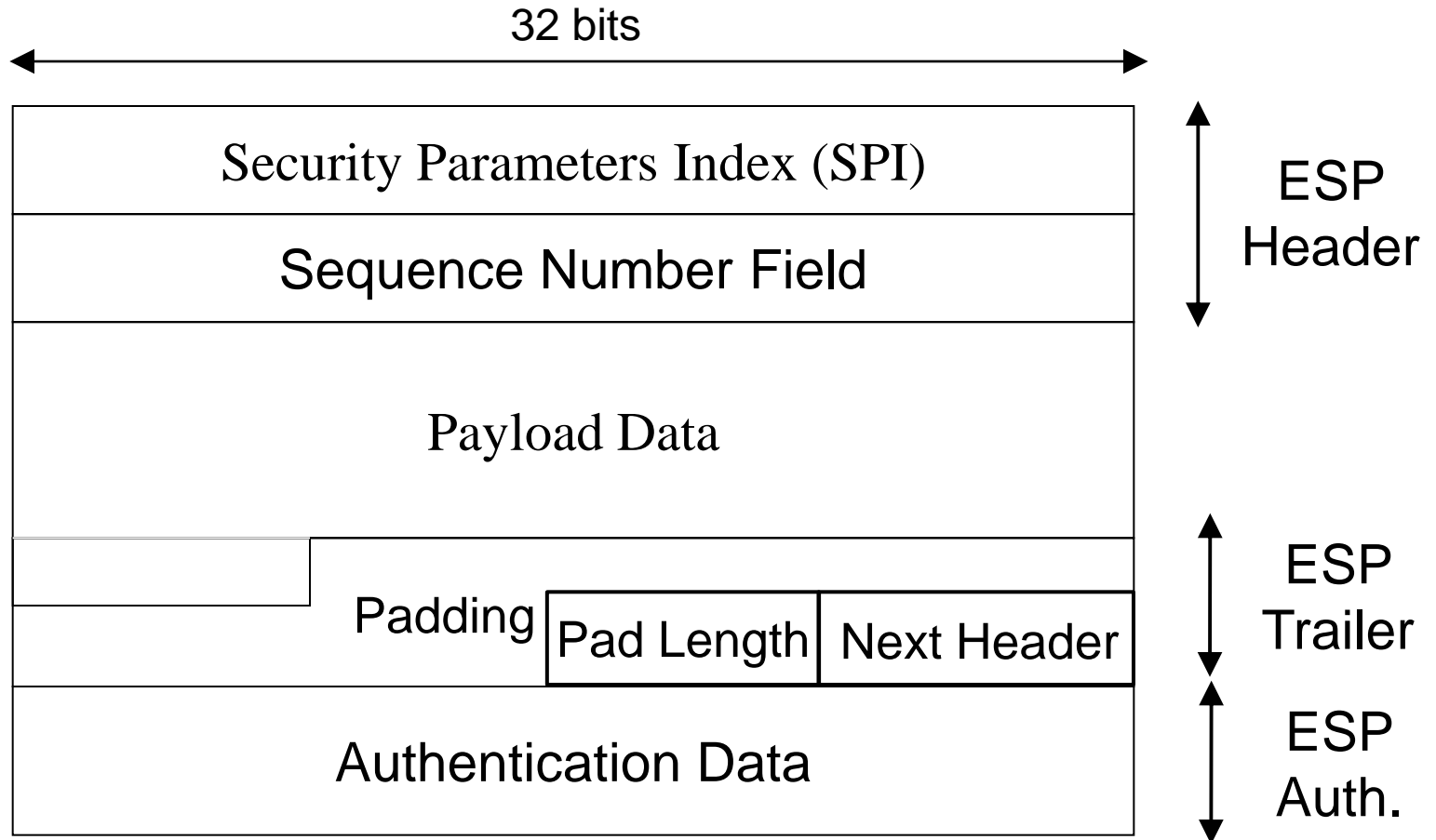
- ✚ Ce concept est fondamental à la fois pour AH et ESP. La combinaison d'un SPI (*Security Parameter Index*) et d'une adresse de destination identifie de manière unique un SA particulier.
- ✚ Une association de sécurité inclue usuellement les paramètres suivant :
 - Un algorithme d'authentification (utilisé pour AH).
 - La (les) clé(s) utilisée(s) par l'algorithme d'authentification.
 - L'algorithme de chiffrement utilisé par ESP.
 - La (les) clé(s) utilisée(s) par l'algorithme de chiffrement.
 - Divers paramètres utiles à l'algorithme de chiffrement.
 - L'algorithme d'authentification utilisé avec ESP (s'il existe)
 - Les clés utilisées avec l'algorithme d'authentification d'ESP (si nécessaire).
 - La durée de vie de la clé.
 - La durée de vie du SA.
 - La ou les adresses de source du SA
 - Le niveau de sécurité (Secret, non classé ...)
- ✚ Le système hôte qui émet l'information sélectionne un SA en fonction du destinataire. L'association de sécurité est de manière générale *mono directionnelle*.



Authentication Header

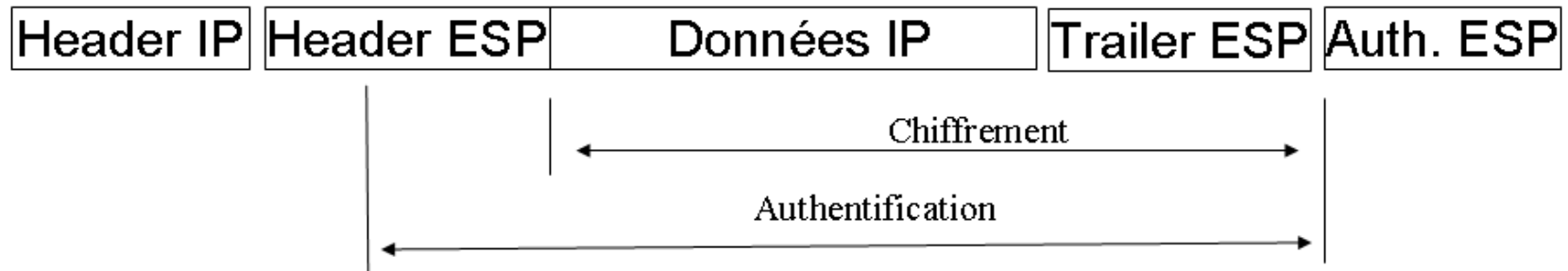


Encapsulating Security Payload

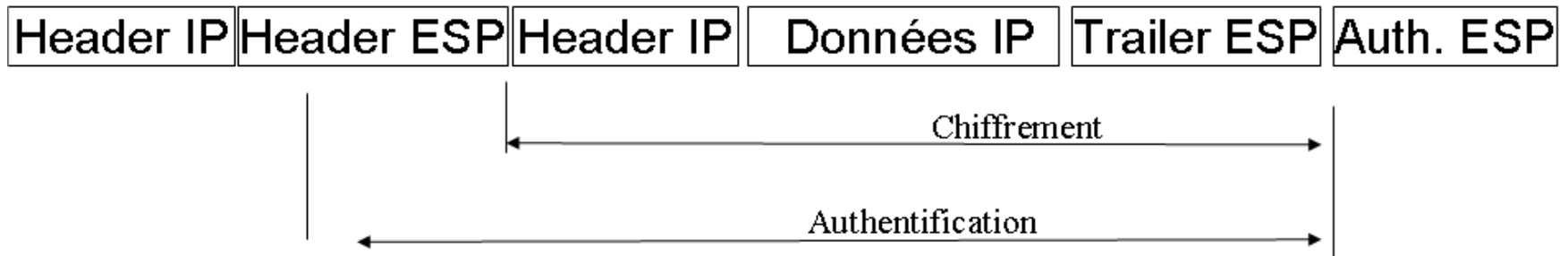


IPSEC: Mode Transport et Mode Tunnel

Mode transport



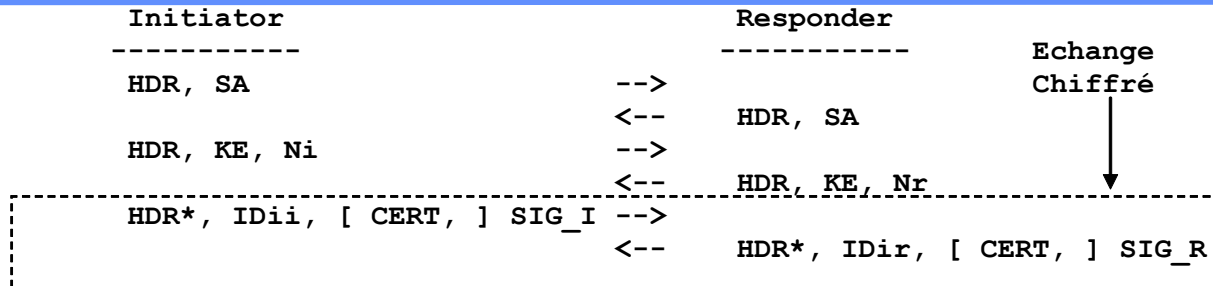
Mode tunnel



- ✚ Internet Key Exchange
- ✚ RFC 2409, 1998
- ✚ IKE PHASE 1 réalise une association de sécurité ISAKMP entre deux systèmes, qui protège les échanges de IKE phase 2
 - 4 modes, Main Mode, Aggressive Mode, Quick Mode, New Group Mode
 - Plusieurs protocoles d'échanges de clés
 - Asymétriques, OAKLEY et SKEME
 - Symétrique (Pre-Shared-Key)
- ✚ IKE PHASE 2 réalise une association de sécurité pour des sessions IPSEC



IKEv1, Pre-Shared-Keys, Main Mode



For pre-shared keys:

$$\text{SKEYID} = \text{prf}(\text{pre-shared-key}, \text{Ni}_b \mid \text{Nr}_b)$$

The result of either Main Mode or Aggressive Mode is three groups of authenticated keying material:

$$\begin{aligned} \text{SKEYID}_d &= \text{prf}(\text{SKEYID}, g^{xy} \mid \text{CKY-I} \mid \text{CKY-R} \mid 0) \\ \text{SKEYID}_a &= \text{prf}(\text{SKEYID}, \text{SKEYID}_d \mid g^{xy} \mid \text{CKY-I} \mid \text{CKY-R} \mid 1) \\ \text{SKEYID}_e &= \text{prf}(\text{SKEYID}, \text{SKEYID}_a \mid g^{xy} \mid \text{CKY-I} \mid \text{CKY-R} \mid 2) \end{aligned}$$

and agreed upon policy to protect further communications. The values of 0, 1, and 2 above are represented by a single octet. The key used for encryption is derived from SKEYID_e in an algorithm-specific manner.

To authenticate either exchange the initiator of the protocol generates HASH_I(SIG_I) and the responder generates HASH_R(SIG_R)

where:

$$\begin{aligned} \text{HASH}_I &= \text{prf}(\text{SKEYID}, g^{xi} \mid g^{xr} \mid \text{CKY-I} \mid \text{CKY-R} \mid \text{SAi}_b \mid \text{IDii}_b) \\ \text{HASH}_R &= \text{prf}(\text{SKEYID}, g^{xr} \mid g^{xi} \mid \text{CKY-R} \mid \text{CKY-I} \mid \text{SAi}_b \mid \text{IDir}_b) \end{aligned}$$

SAi_b is the entire body of the SA payload (minus the ISAKMP generic header), all proposals and all transforms offered by the Initiator. CKY-I and CKY-R are the Initiator's cookie and the Responder's cookie, respectively, from the ISAKMP header. g^{xi} and g^{xr} are the Diffie-Hellman public values of the initiator and responder respectively.

IKeV1, Phase II, Pre-Shared-Key, Quick Mode

Initiator

HDR*, HASH(1), SA, Ni [, KE] [, IDci, IDcr] -->

HDR*, HASH(3) -->

Responder

<-- HDR*, HASH(2), SA, Nr [, KE] [, IDci, IDcr]

HASH(1) = prf(SKEYID_a, M-ID | SA | Ni [| KE] [| IDci | IDcr])

HASH(2) = prf(SKEYID_a, M-ID | Ni_b | SA | Nr [| KE] [| IDci | IDcr])

HASH(3) = prf(SKEYID_a, 0 | M-ID | Ni_b | Nr_b)

KEYMAT = prf(SKEYID_d, protocol | SPI | Ni_b | Nr_b)

IDci, IDcr, identités, les adresses IP en fait.

M-ID, identifiant du message, extrait de l'en tête ISAKMP



SSL/TLS



- ✚ **SSL défini par *netscape* et intégré au browser**
 - Première version de SSL testé en interne
 - Première version de SSL diffusé : V2 (1994)
 - Version actuelle V3
- ✚ **Standard à l 'IETF au sein du groupe Transport Layer Security (TLS)**

+ Authentification

- Serveur (obligatoire), client (optionnel)
- Utilisation de certificat X509 V3
- A l'établissement de la session.

+ Confidentialité

- Algorithme de chiffrement symétrique négocié, clé générée à l'établissement de la session.

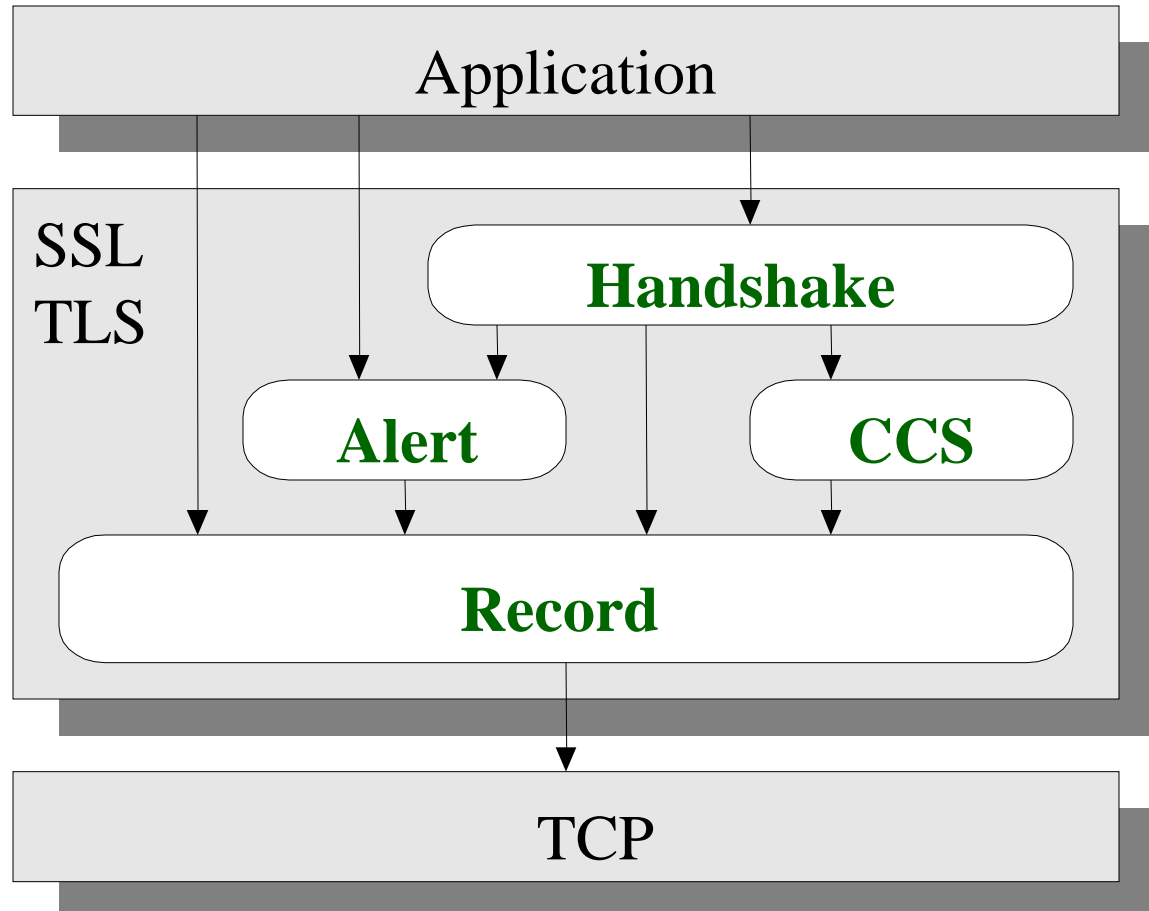
+ Intégrité

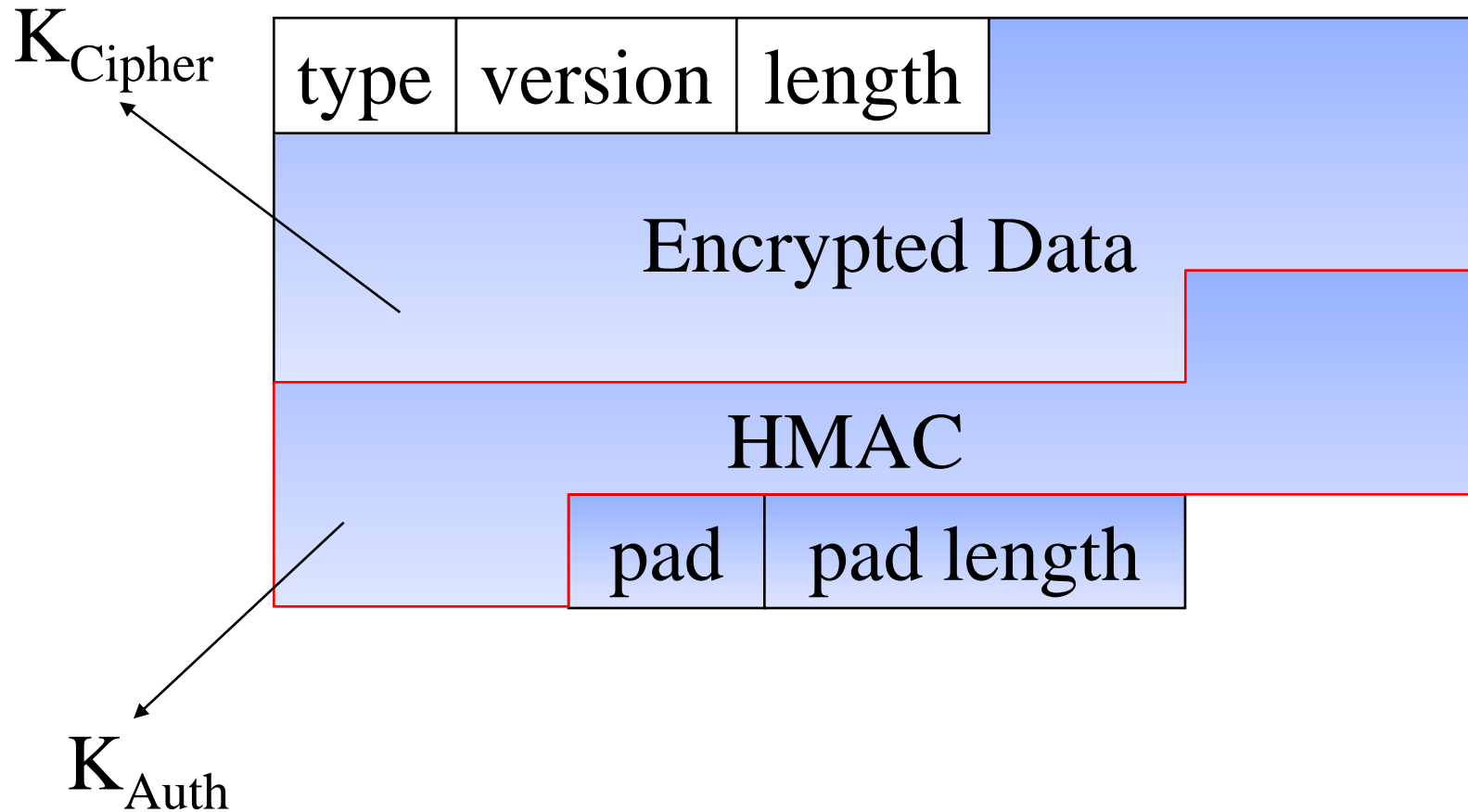
- Fonction de hachage avec clé secrète :
HMAC(clé secrète, Message)

+ Non Rejeu

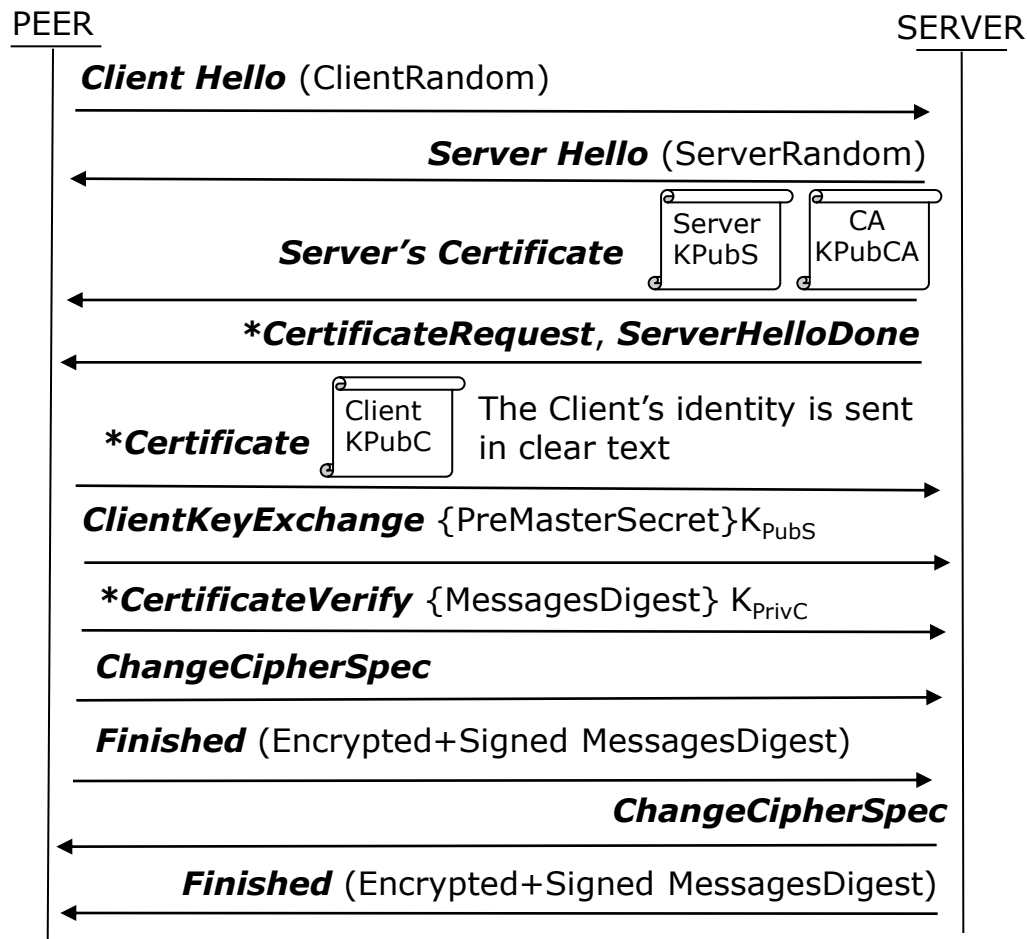
- Numéro de séquence

SSL/TLS : Protocoles





SSL/TLS, Dialogue de base



MasterSecret = PRF(ClientRandom, ServerRandom, PreMasterSecret, ...)

Keys = PRF(ClientRandom, ServerRandom, MasterSecret, ...)



Le modèle EAP



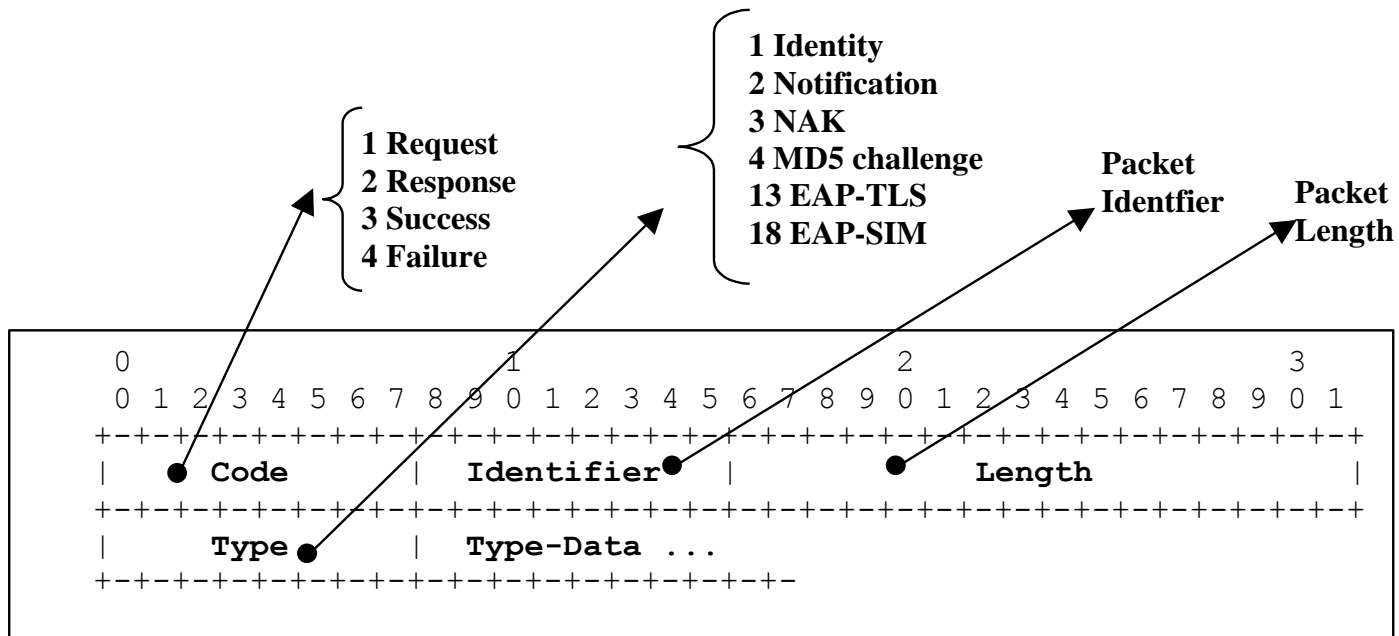
EAP, what else ?

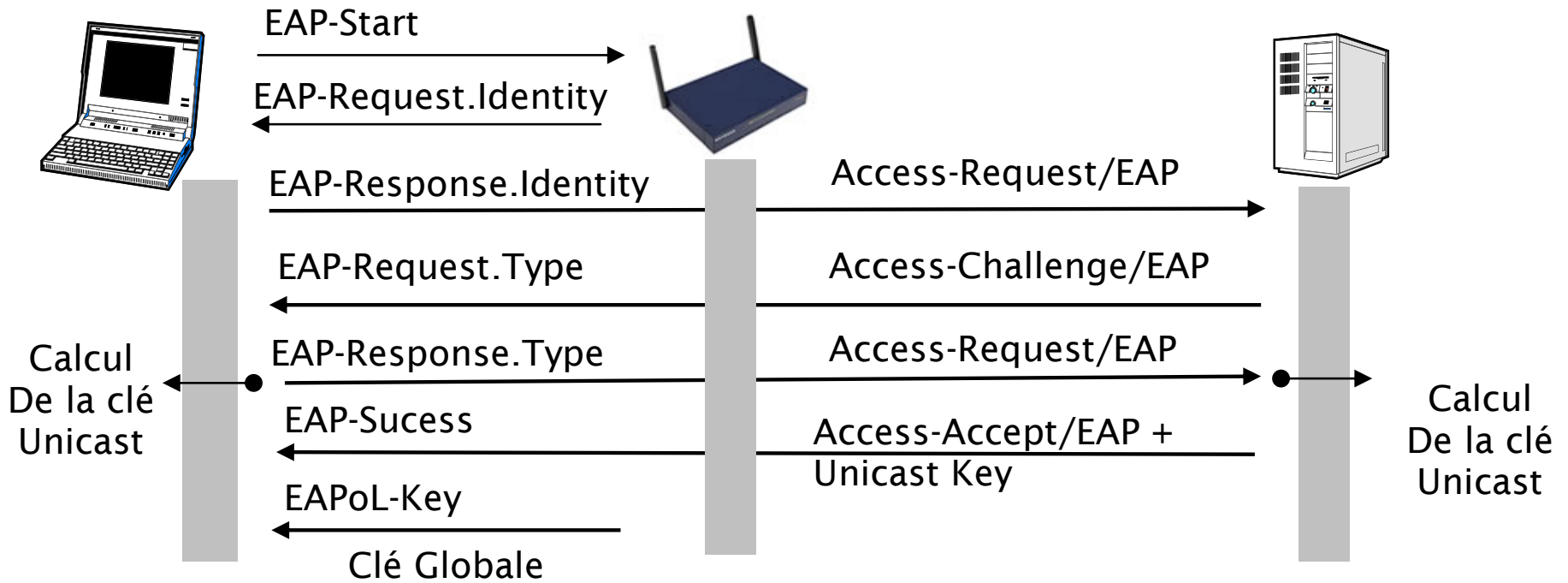
- ✚ The Extensible Authentication Protocol (EAP) was introduced in 1999, in order to define a **flexible authentication framework**.
 - EAP, RFC 3748, "Extensible Authentication Protocol, (EAP)", June 2004.
 - **EAP-TLS**, RFC 2716, "PPP EAP TLS Authentication Protocol", 1999.
 - **EAP-SIM**, RFC 4186, " Extensible Authentication Protocol Method for Global System for Mobile Communications (GSM) Subscriber Identity Modules (EAP-SIM) ", 2006
 - **EAP-AKA**, RFC 4187, " Extensible Authentication Protocol Method for 3rd Generation Authentication and Key Agreement (EAP-AKA) ", 2006
- ✚ EAP Applications.
 - Wireless LAN
 - Wi-Fi, IEEE 802.1x, 2001
 - WiMAX mobile, IEEE 802.16e , PKM-EAP, 2006
 - Wired LANs
 - ETHERNET, IEEE 802.3
 - PPP, RFC 1661, "The Point-to-Point Protocol (PPP)", 1994
 - VPN (Virtual Private Network) technologies
 - PPTP, Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP), RFC 2637
 - L2TP, Layer Two Tunneling Protocol (L2TP), RFC 2661
 - IKEv2, RFC 4306, "Internet Key Exchange (IKEv2) Protocol", 2005
 - Authentication Server
 - RADIUS, RFC 3559, "RADIUS (Remote Authentication Dial In User Service) Support For Extensible Authentication Protocol (EAP)", 2003
 - DIAMETER, RFC 4072, "Diameter Extensible Authentication Protocol Application", 2005
 - Voice Over IP
 - UMA, Unlicensed Mobile Access, <http://www.umatechnology.org>



Le protocole EAP.

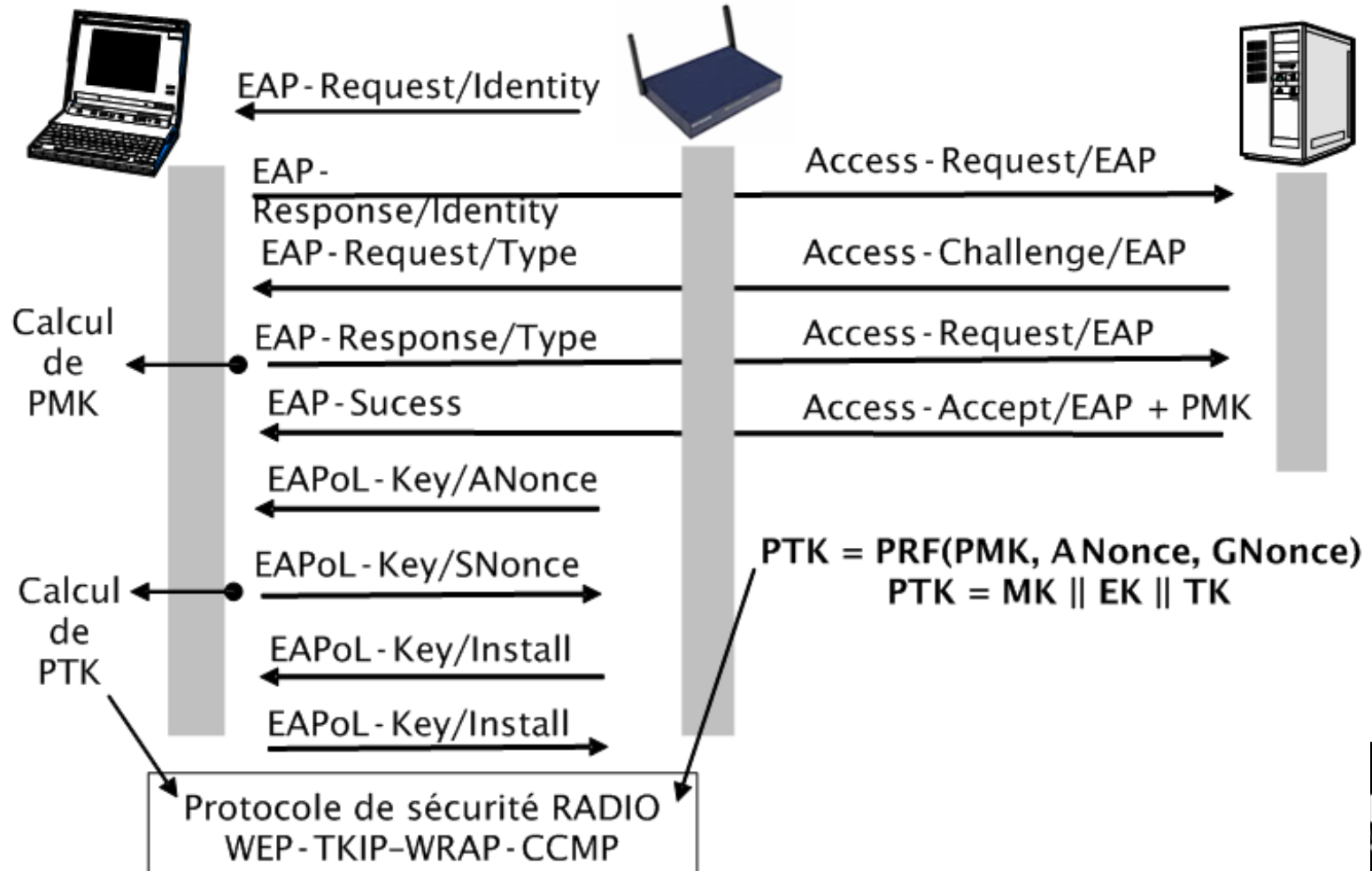
- EAP est conçu pour transporter des scénarios d'authentification.
- Quatre types de messages, requêtes, réponses, succès, échec





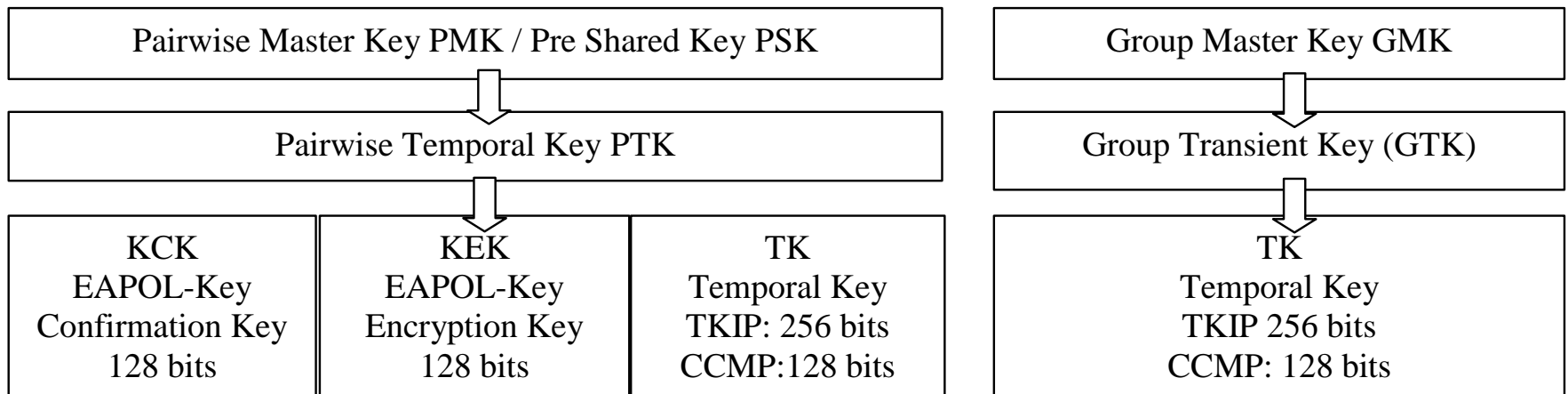
IEEE 802.11i : Distribution des clés

- Four ways handshake (PTK).
- Two ways handshake (GTK).



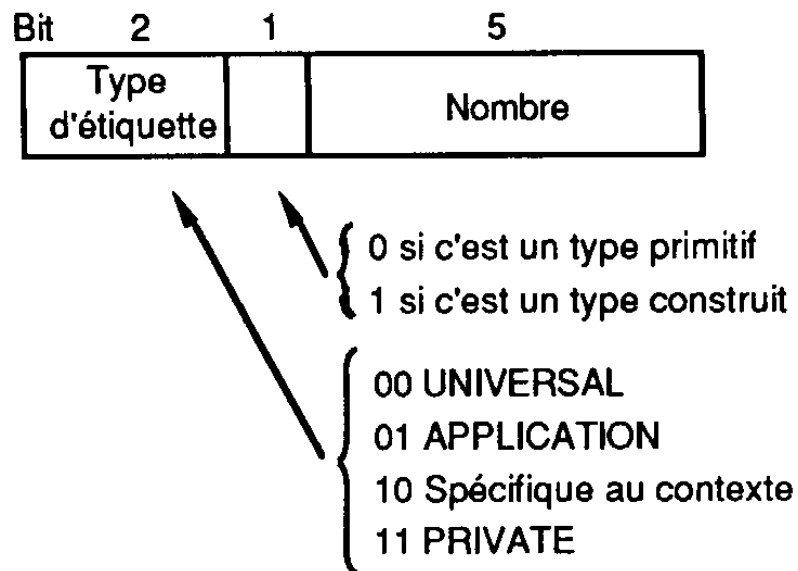
802.11 i: Hiérarchie des clés

- ✚ PMK est déduite de l'authentification EAP.
- ✚ PSK est une alternative à PMK.
- ✚ GMK est une clé maître de groupe.



✚ *L'Abstract Syntax Notation One* normalisé par l'ISO est une syntaxe de transfert de données et comporte les éléments suivants:

- Les types primitifs
- Les constructeurs
- Les étiquettes (tags)



ASN.1- Les types primitifs

- ✚ INTEGER entier de longueur arbitraire
- ✚ BOOLEAN vrai-faux
- ✚ BIT STRING liste de bits
- ✚ OCTET STRING liste d'octets
- ✚ ANY ensemble de tout type
- ✚ OBJECT IDENTIFIER nom d'objet

Type	Primitive
1	BOOLEAN
2	INTEGER
3	BIT STRING
4	OCTET STRING
5	NULL
6	OBJECT IDENTIFIER
7	OBJECT DESCRIPTOR
8	EXTERNAL
16	SEQUENCE et SEQUENCE OF
17	SET et SET OF
18	NumericString
19	PrintableString
20	TeletexString
21	VideotexString
22	IA5String
23	GeneralizedString
24	UTCTime
25	GraphicString
27	GeneralString

ASN.1- Les constructeurs

- ✚ Les types primitifs peuvent être combinés pour construire des types plus complexes
- ✚ SEQUENCE collection ordonnée d'éléments de types divers
- ✚ SEQUENCE OF collection ordonnée d'éléments de même type
- ✚ SET collection désordonnée d'éléments de divers type
- ✚ SET OF collection désordonnée d'éléments de même type.
- ✚ CHOICE choix d'un type parmi une liste donnée.



ASN.1- Les étiquettes (Tags)

- ✚ Les types sont dotés d'une étiquette (tag).
- ✚ Un tag comporte deux parties notées [classe entier]
 - La classe: UNIVERSAL, APPLICATION, PRIVATE, CONTEXT-SPECIFIC
 - un nombre entier
- ✚ Lorsque le tag apparaît sans classe ([entier]) la classe par défaut est CONTEXT-SPECIFIC
- ✚ Exemples
 - [UNIVERSAL 1] BOOLEAN
 - [UNIVERSAL 2] INTEGER
- ✚ Le mot clé **IMPLICITE** placé avant une étiquette permet de supprimer le type des informations étiquetées (exemple [PRIVATE 1] IMPLICITE INTEGER). Cette fonctionnalité est utilisée pour réduire la taille des informations transférées.



- ✚ Le symbole ::= décrit une règle de production
- ✚ Le symbole | sépare les alternatives
- ✚ Exemple :
 - Id_Object ::= OBJECT IDENTIFIER
 - Chiffre ::= « 0 » | « 2 » | « 3 »
 - Class ::= UNIVERSAL | APPLICATION | PRIVATE | VIDE



ASN.1- Binary Encoding Rules BER

- ✚ Chaque valeur transmise contient 4 champs
 - l'identificateur (type ou étiquette).
 - la longueur en octets du champ de données
 - le champ de données
 - le fanion de fin de données si la longueur est inconnue.
- ✚ Ce type de syntaxe est dit TLV (*Type Longueur Valeur*).

+ Encodage de l'identificateur

- pour un nombre ≤ 30
 - b8 b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1
 - Class P/C nombre
- pour un nombre > 30
 - b8 b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1
 - Class P/C 1 1 1 1 1
 - b8 b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1
 - b8=1 nombre
 - b8=0 nombre fin

+ Class

- 00 universal - 01 application - 10 context-specific - 11 private

+ P/C

- 0 primitif 1 construit

+ Encodage de la longueur

- Forme courte b8=0
- Forme longue b8=1, b7...b1= longueur N en octets de la longueur + N octets.
- Forme indéfinie 10000000..valeurs.. 00000000 00000000

