Cryptographie

Protocoles cryptographiques

Alexander Schaub[1]

schaub.alexander@free.fr

19/01/2026

[1]DGA-MI, Bruz

Dans l'épisode précédent…

- On a vu comment **partager** des clés entre deux participants
- On a vu comment **garantir l'authenticité** de données reçues
  - … à condition d'avoir confiance en la **clé publique** de l'expéditeur !

Aujourd'hui, nous allons compléter ces services afin de construire des protocoles de la vraie vie :

Dans l'épisode précédent…

- On a vu comment **partager** des clés entre deux participants
- On a vu comment **garantir l'authenticité** de données reçues
  - … à condition d'avoir confiance en la **clé publique** de l'expéditeur !

Aujourd'hui, nous allons compléter ces services afin de construire des protocoles de la vraie vie :

- SSH v2.0 (RFC4253)
- TLS v1.3 (RFC8446)

Authentification symétrique

Mais avant cela, petit interlude !

- Lors de la dernière séance, nous avons vu l'authentification **asymétrique** grâce aux **signatures électroniques**
- L'authentification symétrique existe en deux variantes :
  - le MAC
  - le chiffrement authentifié (ou AEAD)

MAC (Message Authentication Code)

- Rien à voir avec les Mac(intosh) de la marque à la 🍏
- Rien à voir avec les adresses MAC (Media Access Control) Ethernet
- Comme une signature, mais avec la **même clé** de signature et de vérification

MAC : notation

- Trois ensembles E (messages), F (*tags* ≈ signatures), K (clés MAC)
- De deux fonctions, $f : E \times K \mapsto F, g : F \times E \times K \mapsto \{\text{true}, \text{false}\}$ telles que
  - $\forall x \in E, k \in K, g(f(x,k), x, k) = \text{true}$
  - Trouver $y \in F$ tel que $g(y, x, k) = \text{true}$ revient à connaître k

MAC : construction HMAC (1)

- Les fonctions hachage semblent obtenir des bonnes propriétés pour construire un MAC
- Comment combiner message et clé ?
  - Première tentative : $f(x, k) = \text{HASH}(k \parallel x)$
    - N'est pas sûr ! MD5, SHA1 et SHA2 sont susceptibles à des attaques **par extension de longueur**.

    Étant donné $\text{HASH}(m)$ et la longueur de m, on peut calculer $\text{HASH}(m \| m')$ pour m' arbitraire (L'état interne de ces fonctions de hash à la fin du message est connaissable à partir du haché produit)

MAC : construction HMAC (2)

- Deuxième tentative : $f(x, k) = \text{HASH}(x \parallel k)$
  - Mieux mais à cause de l'attaque par extension de longueur, une collision de HASH sur x produirait une collision sur $f(x, k)$.
- Bonne solution : $f(x, k) = \text{HASH}(k \parallel \text{HASH}(k \parallel x))$
  - Encore mieux si on n'utilise pas la même clé les deux fois :

  $f(x, k) = \text{HASH}(k \oplus \text{opad} \parallel \text{HASH}(k \oplus \text{ipad} \parallel x))$ avec IPAD, OPAD deux constantes (RFC2104)

MAC : à quoi ça sert ?

Imaginons que vous envoyez ce message à votre banquier :

```
Envoyez 10000 euros sur le compte FR76123456789. Mot de passe convenu : bqs87DQ9sdfl98qsf
```

Ce message est chiffré avec un **chiffrement par flot** (rappel : consiste à générer une séquence pseudo-aléatoire et à XORer avec le message).

Eve intercepte le message, elle connait l'ordre et sa formulation mais pas le mot de passe. Elle veut détourner l'argent sur son compte. Comment s'y prend-elle ? Comment modifie-t-elle le message ?

Chiffrement authentifié

- On veut souvent protéger la confidentialité **et** l'intégrité des données
- Combiner les deux services = chiffrement authentifié (ou AEAD)

  L'AEAD permet aussi d'authentifier des données claires en plus mais c'est du bonus
- En général, consiste à combiner un **mode de chiffrement** avec un algorithme de **MAC**
- Algorithmes les plus utilisés :
  - **AES-GCM** : AES-CTR + GHASH
  - **ChaCha20Poly1305** : ChaCha20 + Poly1305
- Constructions plus anciennes : chiffrement + HMAC avec deux clés **distinctes**

AES-GCM

- Utilisé avec de clés de 128-bits (AES-128) et IV de **96 bits**
  - Valeur potentiellemnt problématique : l'espace d'IV est petit si généré aléatoirement
  - L'IV ne doit **jamais** être réutilisé (fuite de la clé d'authentification)

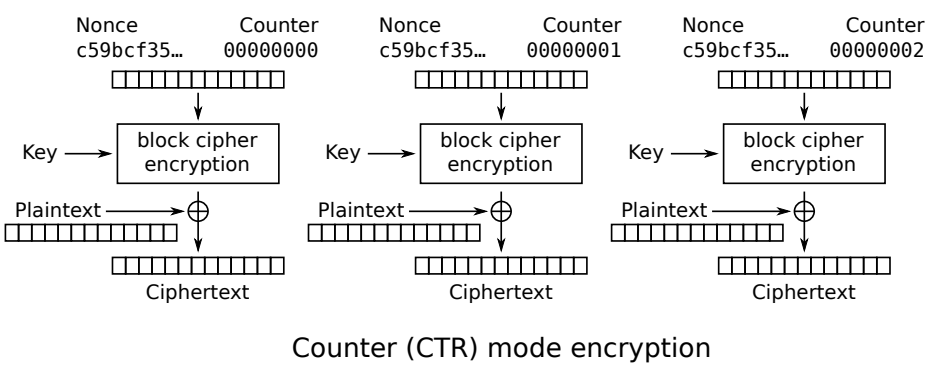


Image 1: (Dé-)Chiffrement CTR

GHASH

Évaluation de polynôme : si $S_i \in (0,1)^{128}, i = 1..m+n+1$ sont les données à protéger en intégrité (m blocs de données additionnelles, n blocs de chiffré paddés avec des 0 + les tailles), alors

$$\text{tag} = \text{Chiff}_k(\text{IV} \parallel 0^{32}) + \sum_{i=1}^{m+n+1} S_i \cdot H^{2+m+n-i}$$

[dans GF(2^{128})]

où $H = \text{Chiff}_k(0^{128})$

Chacha20Poly1305

- Clé de 256 bits, IV de 96 bits
  - XChacha20Poly1305 avec IV de 192 existe et serait mieux, mais pas standardisé 😔
- Poly1305 : évaluation de polynôme. Soit S identique que précédemment,

$$\text{tag} = \left(s + \sum_{i=1}^{m+n+1} (S_i + 2^{128}) \cdot r^{2+m+n-i} \bmod (2^{130} - 5)\right) \bmod (2^{128})$$

où $\text{Chacha20}_k(\text{IV} \| 0^{32}) = r \| s \| 0^{256}$ et $|r| = |s| = 128$ bits

(pas tout à fait exact pour le dernier S_i mais passons)

Stockage de mot de passe

Email	Mot de passe
xxkevindu36xx@hotmail.fr	roxxor
jean.charles@gmail.com	pupuce1993
john.doe@fr.fr	lkqj098qlkjdq78!09dq
xxxamandinedu39xxx@skyblog.fr	roxxor

→ Il ne faut jamais stocker les mots de passe en clair

Risque de fuite de données, mise en danger des utilisateurs si réutilisation du mot de passe, etc.

Stockage des mots de passe : fonction de hachage

Email	Mot de passe
xxkevindu36xx@hotmail.fr	342887f489f…
jean.charles@gmail.com	94363ba85ef0f…
john.doe@fr.fr	ced2f800c497ba2…
xxxamandinedu39xxx@skyblog.fr	342887f489f…

Deux problèmes :

- Mots de passe identiques = hachés identiques
- Haché fonction du mot de passe uniquement : possibilité d'attaque par dictionnaire inversé

Stockage des mots de passe : fonction de hachage + sel

Email	sel	Mot de passe
xxkevindu36xx@hotmail.fr	su8qlsdu	34e3808164a…
jean.charles@gmail.com	od9us67s	7c27b2a16d27429…
john.doe@fr.fr	nsk9jd24	34a37ab14b39dafd…
xxxamandinedu39xxx@skyblog.fr	nmqh75s0	c8d6c66cebe42…

Un problème :

- Mots de passe identiques = hachés différents , mais
- Fonction de hachage facile à calculer : inversion d'un mot de passe faible possible

Stockage de mots de passe : dérivation de clé

Utilisation similaire à fonction de hachage avec sel mais :

- optimisé pour être difficile à inverser par GPU / puce dédiée (ASIC)
- Malheureusement, possèdent souvent plein de paramètres à choisir (prendre ceux par défaut de la bibliothèque cryptographique choisie !)

Algorithmes conseillés :

- argon2id
- balloon
- scrypt

Algorithmes historiques :

- PBKDF1 (à éviter !)
- PBKDF2 (HMAC itéré)
- bcrypt

Protocoles cryptographiques

- On a vu tous les “blocs de base” de la cryptographie “courante”
- Il faut ensuite les associer pour obtenir des services possédant les bonnes propriété :
  - confidentialité des échanges
  - intégrité des données échangées
  - garanties quant à l’identité des participants
  - …

Nous en verrons deux plus en détail: SSHv2 et TLS v1.3.

SSH : présentation

Permet de se connecter **de façon sécurisée** à un serveur distant et d'agir comme si on y était connecté physiquement (entre autres; permet aussi le transfert de fichier, le *tunneling* d'autres flux réseau, etc.)

Protocole assez ancien : première version en 1995, pour remplacer `telnet`. v2 améliorant grandement la sécurité en 2006.

SSH : Négotiation d'algorithmes

Liste d'algorithmes acceptés

Algorithmes pour :

- échange de clés
- capacité des clés serveur (signature ou chiffrement)
- chiffrement de données client ⟶ serveur et serveur ⟶ client
- MAC client ⟶ serveur et serveur ⟶ client

SSH : Négotiation d'algorithmes

Liste d'algorithmes acceptés

Algorithmes pour :

- échange de clés
- capacité des clés serveur (signature ou chiffrement)
- chiffrement de données client ⟶ serveur et serveur ⟶ client
- MAC client ⟶ serveur et serveur ⟶ client

SSH : Échange de clés (Diffie-Hellman)

x

$$\xrightarrow{\qquad\qquad e = g^x \bmod p \qquad\qquad}$$

Note: le groupe (défini par g et p) est public et partagé suite à la négotiation d'algorithmes

SSH : Échange de clés (Diffie-Hellman) (II)

x

$$\xleftarrow{K_{\text{verif}}, g^y \bmod p, \text{Sign}_{K_{\text{sig}}}(H)}$$

$K_{\text{sign}}, K = e^y \bmod p,$

$H = \text{Hash}(K \parallel e \parallel f \parallel ..)$

Deux manières de vérifier l'authenticité de K_{verif}:

- Un certificat (plus d'infos dans la prochaine partie !)
- TOFU (*Trust On First Use*) : on accepte la première clé publique reçue du serveur et on la stocke pour une vérification ultériure

SSH : Échange de clés (Diffie-Hellman) (II)

$x, K = f^x \bmod p, H = \text{Hash}(...)$

$K_{\text{sign}}, K = e^y \bmod p, H = \text{Hash}(K \parallel e \parallel f \parallel ..)$

Le client vérifie la signature. Si elle convient, le serveur et le client se sont mis d'accord sur H et K, puis dérivent :

- l'IV de chiffrement initial (client $\longrightarrow$ serveur et serveur $\longrightarrow$ client)
- les clés de chiffrement et MAC client $\longrightarrow$ serveur et serveur $\longrightarrow$ client

SSH : Tunnel non-sécurisé

Un paquet SSH échangé contient les données suivantes :

- taille du paquet (sur 4 octets)
- taille du padding (sur 1 octet)
- données utiles (taille du paquet - taille du padding - 1)
- padding aléatoire (taille nécessaire)
- MAC (taille en fonction de l'algo MAC choisi)

Padding : au moins 4 octets, la taille des quatre premières données doit être multiple de 8 ou de la taille du bloc de l'algorithme de chiffrement.

SSH : Tunnel sécurisé

Après échangé des clés :

- les quatre premières données sont chiffrées (taille du paquet, taille du padding, données utiles, padding aléatoire)
- le MAC est calculé sur ces quatre champs en clair concaténé à un numéro de séquence (pour éviter le rejeu)

Le tunnel sécurisé n'est pas particulièrement élégant - pouvez-vous me dire pourquoi ?

SSH : authentification

Une fois le tunnel établi, le client peut se connecter :

- soit via clé publique : le serveur connaît la clé publique, et le client signe (entre autres) la valeur H
- soit via mot de passe, en le transmettant dans le tunnel sécurisé

TLS 1.3 : Le HTTPS *moderne*

Un petit récapitulatif :

- SSL 1.0 initialement développé par Taher ElGamal (le même qui a inventé le chiffrement ElGamal) chez Netscape (l'ancêtre de Mozilla)
- SSL 1.0 est tout cassé, Netscape développe SSL 2.0 qui est rendu public en 1995
- SSL 2.0 est **également** tout cassé, ce qui donne SSL 3.0 en 1996
- L'IETF se réveille en 1999 et standardise TLS1.0, une variante de SSL 3.0
- TLS 1.1 et 1.2 modernisent *un peu* le protocole
- TLS 1.3, sorti en 2018, fait le grand ménage, enlève les options obsolètes et corrige plusieurs failles

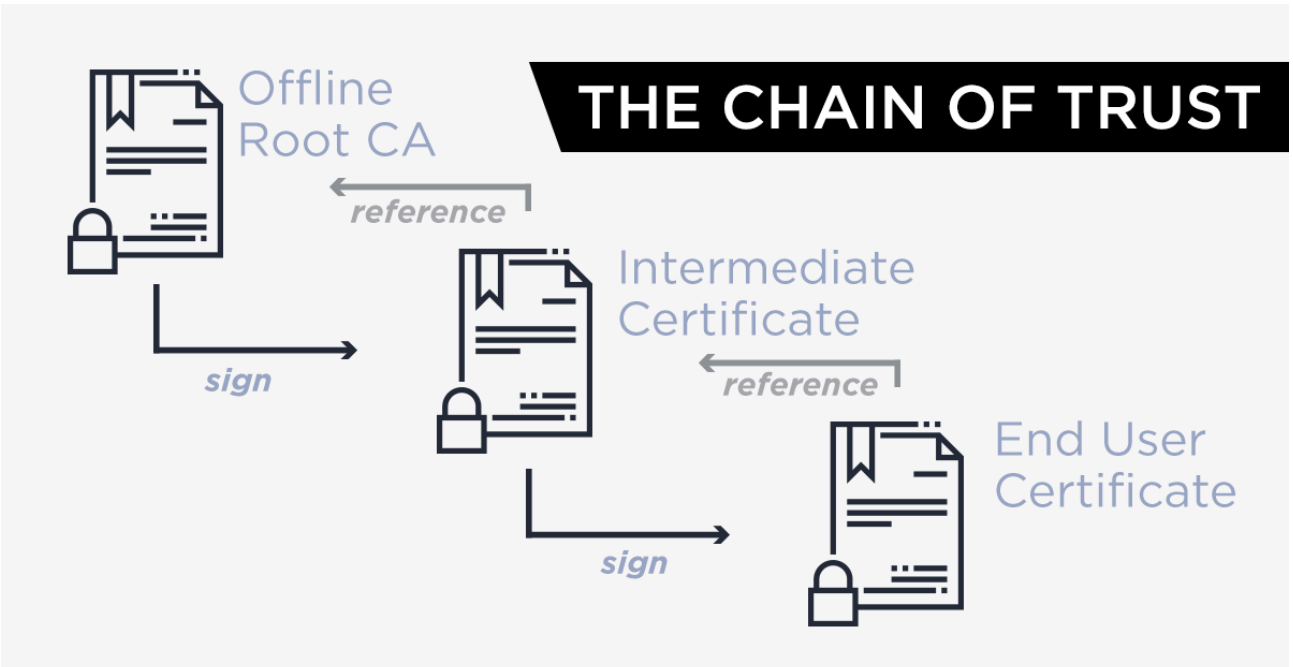
TLS : Objectif

Il s'agit d'établit **un tunnel sécurisé** entre votre **navigateur** et un **serveur web** (proposant un service HTTP).

Doit être compatible HTTP : le protocole fonctionne au-dessus d'une connection **TCP** uniquement.

Doit être résistant aux attaques par homme-du-milieu : plus question de *TOFU*, mais de **certificats**.

TLS : Certificats



source: https://www.exoscale.com

Aparté : Que contient un certificat ?

- Dates de validité (pas avant / pas après)
- Nom(s) de domaine
  - avec potentiellement des *wildcard*, i.e. tous les sous-domaines
    - par contre, *.com est interdit. Et *.co.uk aussi…
- Une clé publique (pour la signature, ou le chiffrement asymétrique, ou l'échange de clés)
- Les usages possibles (authorité racine, intermédiaire, certificat final)
- Une signature d'une authorité supérieure
- L'identifiant de cette authorité

TLS1.3 : Négotiation d'algorithmes

Liste d'algorithmes acceptés

Algorithmes pour :

- chiffrement authentifié/dérivation de clé HKDF
- groupes (EC)DHE supportés + clés publiques associéés
- algorithmes de signature (pour TLS / optionnellement pour certificats)
- *optionnellement : clé pré-partagée (issue d'une connexion précédente)*

TLS1.3 : Choix d'algorithmes

- Choix d'algorithme de chiffrement
- Choix de groupe (EC)DHE + clé publique éphémère associée

TLS1.3 : Certificat serveur

Certificat + Signature

- certificat (contenant une clé de vérification) + chaîne de certificats
- signature du message client + message serveur + certificat (avec la clé correspondante au certificat)

Aparté : Diffie-Hellman éphémère

Pour faire un échange de clés authentifié :

- Soit le certicat contient la clé publique DH du serveur,
- Soit :
  - le certificat contient une clé de vérification de signature,
  - le serveur génère un nouveau bi-clé pour chaque échange de clés
  - le serveur signe la clé publique de cette bi-clé

Deuxième solution appelée “échange de clé éphémère” (la première est dite *statique*)

Aparté : Diffie-Hellman éphémère et *PFS*

PFS : *Perfect Forward Secrecy*

Même si la clé **privée** du certificat serveur est diffusée, les échages **antérieurs à cette diffusion** ne peuvent pas être compromis.

Diffie-Hellman éphémère possède la propriété PFS. Ce n'est **pas le cas** pour un Diffie-Hellman statique.

TLS1.3 : Fin de la négociation serveur

Le serveur envoie un HMAC des messages précédents. La clé est dérivée du secret partagé par (EC)DHE.

TLS1.3 : Fin de la négociation client

Le **client** envoie un HMAC des messages précédents. La clé est dérivée du secret partagé par (EC)DHE. Cela assure que les deux parties ont bien **dérivé la même clé**.

TLS1.3 : Tunnel sécurisé

Après établissement d'un clé de session :

- Les données sont envoyées chiffrés en utilisant du **chiffrement authentique**
- L'en-tête clair contient la taille des données
- Les applications utilisant TLS peuvent utiliser un **padding optionnel** (qui sera chiffré) pour tenter de **cacher la taille des données**

La semaine prochaine : un petit bonus et **présentation des projets**

Bon courage !