



Introduction à la sécurité

Chapitre 2 La cryptographie symétrique



Pablo Rauzy <pr@up8.edu>
pablo.rauzy.name/teaching/is

La cryptographie symétrique

- ▶ La cryptographie **symétrique** (aussi appelée **à clef secrète**) est la plus ancienne forme de chiffrement.
- ▶ Le principe est d'avoir une clef partagée par l'émetteur et le destinataire, qui permet à la fois de chiffrer et déchiffrer les messages.

Le chiffrement par substitutions

- ▶ Les chiffrements par substitutions que l'on a vu pendant la dernière séance (César, Vigenère) font parti de la cryptographie symétrique.
- ▶ Les techniques de chiffrement symétrique ont évoluées depuis.

Les techniques modernes

- ▶ Aujourd'hui on a besoin de chiffrer plus que de simples messages textes.
- ▶ Les algorithmes fonctionnent donc sur des bits, et non plus sur des lettres.
- ▶ D'autre part, la discipline s'est formalisée.

Deux grandes catégories

- ▶ Il existe deux grandes familles de chiffrements symétriques modernes :
 - les chiffrements par bloc, et
 - les chiffrements par flot.

Chiffrement par bloc

- ▶ Un algorithme de **chiffrement par bloc** ne sait chiffrer qu'un bloc de bits d'une taille donnée.
- ▶ Le principe est donc de découper le message en blocs de cette taille et de les chiffrer un par un, indépendamment.
- ▶ Exemples :
 - DES (ancien standard)
 - AES (standard actuel)

Chiffrement par flot

- ▶ Un algorithme de **chiffrement par flot** peut traiter des données de taille quelconque.
- ▶ Exemples :
 - A5/1 (GSM)
 - E0 (Bluetooth)
 - RC4 (WEP)

- ▶ Avant de continuer sur les chiffrements par bloc et par flot, voyons ce qu'on appelle le **masque jetable** (ou **chiffrement de Vernam**).
- ▶ Le principe est celui d'un chiffrement de Vigenère, mais avec une clef aussi longue que le message (en pratique on utilise des bits et un ou-exclusif plutôt qu'une addition modulaire sur l'alphabet).
- ▶ Ce type de chiffrement est **incassable**, à condition que :
 - la clef soit bien aussi longue que le message à chiffrer,
 - les caractères (ou bits) composant la clef soient choisis aléatoirement,
 - chaque clef ne soit utilisée qu'une seule fois (d'où le "jetable").

- ▶ Avant de continuer sur les chiffrements par bloc et par flot, voyons ce qu'on appelle le **masque jetable** (ou **chiffrement de Vernam**).
- ▶ Le principe est celui d'un chiffrement de Vigenère, mais avec une clef aussi longue que le message (en pratique on utilise des bits et un ou-exclusif plutôt qu'une addition modulaire sur l'alphabet).
- ▶ Ce type de chiffrement est **incassable**, à condition que :
 - la clef soit bien aussi longue que le message à chiffrer,
 - les caractères (ou bits) composant la clef soient choisis aléatoirement,
 - chaque clef ne soit utilisée qu'une seule fois (d'où le "jetable").
- ▶ En effet, si on ne connaît que le texte chiffré, et que toutes les clefs sont équiprobables, alors tous les textes clairs de cette longueur sont possibles avec la même probabilité.
- ▶ Cette sécurité est inconditionnelle (elle ne repose pas sur une difficulté de calcul).

En pratique

- ▶ En pratique, il est presque impossible de mettre ce type de chiffrement en application.
- ▶ Il est très difficile de générer des clefs parfaitement aléatoires.
- ▶ La distribution des clefs est fortement problématique (peut-être que la cryptographie quantique sera une solution).

- ▶ Le **chiffrement par flot** permet de chiffrer un flux continu de données.
- ▶ Il tente pour cela de reproduire le principe du masque jetable, mais en construisant algorithmiquement un **flux de clef** à partir d'une clef secrète.

Générateur de nombres pseudo-aléatoires

- ▶ Il faut donc une méthode permettant de générer un flux de clef composé de bits “aléatoires”, mais reproductible à partir de la clef secrète pour permettre le déchiffrement.
- ▶ La solution est l'utilisation d'un **générateur de nombres pseudo-aléatoires** (PRNG).
- ▶ Un PRNG est un algorithme qui génère une suite de nombre présentant certaines propriété du hasard (comme sembler indépendant les uns des autres).

Générateur congruentiel linéaire

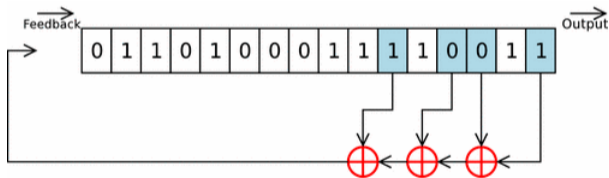
- ▶ Un **générateur congruentiel linéaire** est un algorithme de la forme :
$$x_{n+1} = (a \cdot x_n + b) \bmod m.$$
- ▶ On appelle le terme initial x_0 la **graine**.
- ▶ Le choix des valeurs de a , b , et m est crucial.
- ▶ Mais quelles qu'elles soient, la suite est nécessairement ultimement périodique.

Générateur congruentiel linéaire

- ▶ Un **générateur congruentiel linéaire** est un algorithme de la forme :
$$x_{n+1} = (a \cdot x_n + b) \bmod m.$$
- ▶ On appelle le terme initial x_0 la **graine**.
- ▶ Le choix des valeurs de a , b , et m est crucial.
- ▶ Mais quelles qu'elles soient, la suite est nécessairement ultimement périodique.
 - En effet elle ne peut prendre au maximum qu'un nombre fini de valeurs (égal à m).

Registre à décalage à rétroaction linéaire

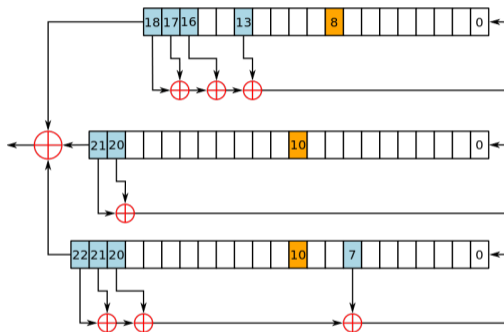
- ▶ Un **registre à décalage à rétroaction linéaire** (LFSR) produit une suite de bits.
- ▶ Le principe est d'opérer à chaque étape à un décalage d'un côté pour récupérer le bit "perdu", et de faire entrer par l'autre côté une combinaison linéaire (produite avec des ou-exclusif) des valeurs à cette étape de certains bits du registre.
- ▶ Pour un usage cryptographique, la fonction de rétroaction doit être choisi de façon à obtenir une période la plus grande possible.



- ▶ A5/1 est un exemple d'algorithme de chiffrement par flot.
- ▶ Il est utilisé pour les communications GSM en Europe et aux USA.
- ▶ Ce n'est pas un algorithme très sécurisé... par volonté.
 - A5/2 en est même une version affaiblie destinée à l'export.
 - On sait depuis les révélations de Snowden que la NSA sait casser A5/1 en temps réel.
- ▶ Il a été développé en 1987 mais a été gardé secret jusqu'à être retrouvé par rétro-ingénierie en 1999 (en partie en 1994) par M. Briceno.

Fonctionnement

- ▶ A5/1 fonctionne en utilisant 3 registres à décalage à rétroaction linéaire.



- ▶ Un registre est décalé si son bit orange correspond à la majorité des 3 bits orange.
- ▶ On insère alors un bit correspondant à un ou-exclusif entre ses bits en bleu.

Initialisation

- L'initialisation s'effectue avec la clef de 64 bits et le compteur initial de 22 bits :
1. Mettre tous les registres à 0.
 2. Pour chacun des 64 bits k_i de la clef :
 - on effectue un ou-exclusif entre k_i et le lsb de chaque registre,
 - on décale chaque registre.
 3. Pour chacun des 22 bits c_i du compteur :
 - on effectue un ou-exclusif entre c_i et le lsb de chaque registre,
 - on décale chaque registre.

- ▶ Un algorithme de **chiffrement par bloc** chiffre un bloc de bits d'une taille donnée.

Modèle itératif

- ▶ La plupart des chiffrements par bloc fonctionnent suivant un **modèle itératif**.
- ▶ C'est à dire qu'une même transformation est appliquée plusieurs fois sur les données.
- ▶ On parle alors de **tours** (ou de **rondes**).
- ▶ Parfois, le premier et/ou le dernier tour sont différents des autres.
- ▶ Formellement, pour un algorithme avec des blocs de taille s et r tours :
 - On a une fonction F qui prend une clef k et le message m de s bits.
 - La fonction F est itérée r fois.
 - À chaque tour, on change la clef et on utilise le résultat de l'itération précédente :
$$c_1 = F(k_1, m)$$
$$c_2 = F(k_2, c_1)$$
$$\dots$$
$$c_r = F(k_r, c_{r-1})$$
$$c = c_r$$
 - Les **sous-clefs** k_i sont déduites de la clef k dans l'algorithme de **préparation des clefs**.

Permutation

- ▶ La fonction F utilisée dans le modèle itératif doit être une permutation.

Permutation

- ▶ La fonction F utilisée dans le modèle itératif doit être une permutation.
- ▶ C'est une permutation car c'est une bijection d'un ensemble dans lui même.

Permutation

- ▶ La fonction F utilisée dans le modèle itératif doit être une permutation.
- ▶ C'est une permutation car c'est une bijection d'un ensemble dans lui même.
- ▶ C'est une bijection parce que c'est à la fois une injection et sur surjection.

Permutation

- ▶ La fonction F utilisée dans le modèle itératif doit être une permutation.
- ▶ C'est une permutation car c'est une bijection d'un ensemble dans lui même.
- ▶ C'est une bijection parce que c'est à la fois une injection et sur surjection.
- ▶ C'est une injection parce qu'on veut pouvoir déchiffrer.

Permutation

- ▶ La fonction F utilisée dans le modèle itératif doit être une permutation.
- ▶ C'est une permutation car c'est une bijection d'un ensemble dans lui même.
- ▶ C'est une bijection parce que c'est à la fois une injection et sur surjection.
- ▶ C'est une injection parce qu'on veut pouvoir déchiffrer.
- ▶ C'est une surjection pour des raisons de sécurité : on veut que la sortie dépende le moins possible de l'entrée, et idéalement que F soit une fonction pseudo-aléatoire, c'est à dire qu'on ne puisse pas distinguer ses sorties de celle d'une fonction aléatoire, et il faut donc a minima que toutes les valeurs de sortie soient possibles.

Préparation des clefs

- ▶ Il existe différentes façons de dériver des sous-clefs :
 - Simplement prendre des morceaux de la clef principale (TEA).
 - Lui faire subir des rotations variables par morceaux (DES).
 - Ou encore d'autres transformations plus complexes (PRESENT, AES).
- ▶ L'important est d'**équilibrer** l'usage des différents bits de la clef.

Confusion et diffusion

- ▶ La **confusion** correspond à la volonté de rendre la relation entre la clef de chiffrement et le texte chiffré la plus complexe possible.
 - Concrètement, on veut idéalement que chaque bit du chiffré dépende de manière non-linéaire d'un maximum de bits du clair et d'un maximum de bits de la clef.
- ▶ La **diffusion** correspond à la volonté de décorrélérer les statistiques du texte clair avec celles du texte chiffré.
 - Concrètement, on veut que chaque bit du clair ou de la clef affecte un maximum de bits du chiffré.
- ▶ Ces concepts sont proposés par Shannon en 1949.



Claude Shannon (graffiti à La Demeure du Chaos)

Effet avalanche

- ▶ L'idée de l'**effet avalanche** est d'augmenter la diffusion au fur et à mesure que les données se propagent dans l'algorithme.
- ▶ Le **critère d'avalanche stricte** est vérifié si pour toute inversion d'un bit en entrée (donc sur le texte clair ou sur la clef), alors chaque bit en sortie (donc du chiffré) a une probabilité 0.5 d'être modifié.

Boîtes de substitution

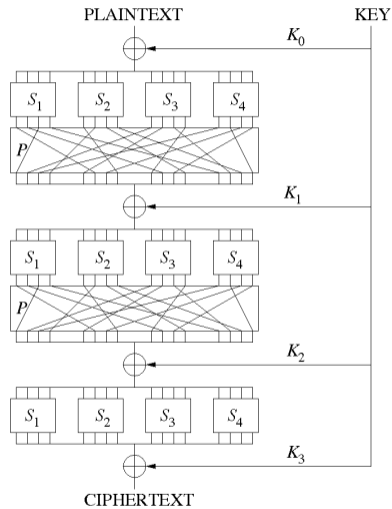
- ▶ Une **boîte S** prends m bits en entrée et produit n bits en sortie par une opération non linéaire (idéalement, une **fonction booléenne courbe**).
 - Idéalement, changer un bit en entrée d'une boîte S doit changer la moitié des bits en sortie.
 - De plus, chaque bit de sortie doit dépendre de tous les bits en entrée.
- ▶ On les implémente généralement avec une **table de correspondance**.
- ▶ L'utilisation de boîtes S contribue à la confusion.

Boîtes de permutation

- ▶ Une **boîte P** applique une permutation des bits du bloc.
- ▶ L'utilisation de boîtes P contribue à la diffusion.

Réseau de substitution-permutation

- ▶ Seule, une boîte S ou une boîte P n'a pas de robustesse cryptographique, mais en les combinant de la bonne manière on arrive à satisfaire les propriétés de confusion et diffusion.
- ▶ On appelle **réseau de substitution-permutation** (RSP) une série de transformations d'un bloc de bits.
- ▶ Il s'agit généralement d'une suite de couches de plusieurs boîtes S suivi d'une boîte P.
- ▶ Entre les couches la clé de chiffrement est généralement ajoutée (le plus souvent sous la forme de **sous-clefs**, à l'aide d'un ou-exclusif).



PRESENT

- ▶ PRESENT est un exemple d'algorithme de chiffrement sur le modèle itératif qui a une structure de RSP.
- ▶ Il est publié par A. Bogdanov, L. R. Knudsen, G. Leander, C. Paar, A. Poschmann, M. J. B. Robshaw, Y. Seurin, et C. Vikkelsoe à CHES en 2007.
- ▶ C'est un algorithme léger, simple, et optimisé pour l'embarqué :
 - La taille des blocs est de 64 bits.
 - La clef fait 80 (ou 128) bits.
 - Il fait 31 tours similaires puis un ajout de clef final.
 - Il utilise une seule boîte S de 4×4 bits optimisée pour le hardware (14 portes logiques).
- ▶ La structure haut-niveau de PRESENT est la suivante :

```
1 k = generate_round_keys(key)
2 state = plaintext
3 for i = 1 to 31 do
4     state = add_round_key(state, k[i])
5     state = sbox_layer(state)
6     state = pbox_layer(state)
7 end
8 ciphertext = add_round_key(state, k[32])
```

Boîte S

- ▶ La boîte S de PRESENT est la suivante :

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
$S(n)$	c	5	6	b	9	0	a	d	3	e	f	8	4	7	1	2

- ▶ C'est a priori la plus petite boîte S 4×4 satisfaisant les propriétés de sécurité (fonction courbe) en matériel.

Boîte P

- La permutation de PRESENT est la suivante :

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P(i)$	0	16	32	48	1	17	33	49	2	18	34	50	3	19	35	51

i	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$P(i)$	4	20	36	52	5	21	37	53	6	22	38	54	7	23	39	55

i	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
$P(i)$	8	24	40	56	9	25	41	57	10	26	42	58	11	27	43	59

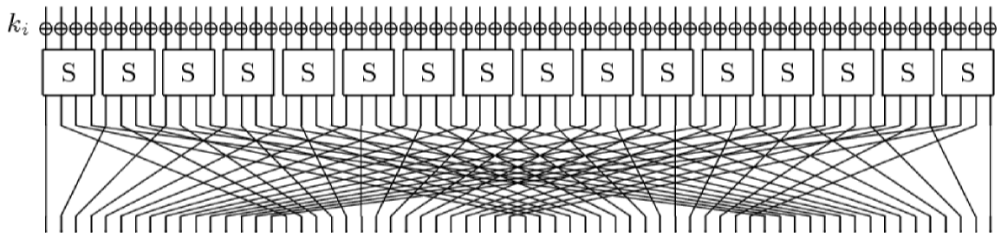
i	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
$P(i)$	12	28	44	60	13	29	45	61	14	30	46	62	15	31	47	63

- C'est à dire $P(i) = \begin{cases} 16 \times i \bmod 63, & 1 \leq i \leq 62 \\ i, & i \in \{0, 63\} \end{cases}$.

Préparation des clefs (80 bits)

- En voyant la clef k comme un tableau de 80 bits, la clef k_i du tour $1 \leq i \leq 32$ se calcule de la façon suivante :
- $k'_1 = k$
 - $t_i = k'_{i-1}[19 : 80] + k'_{i-1}[0 : 19]$
 - $k'_i = t_i[0 : 15] + (t_i[16 : 20] \oplus i) + t_i[21 : 75] + S(t_i[76 : 80])$
 - $k_i = k'_i[0 : 64]$

- Représentation d'un tour de PRESENT en visualisation de RSP :



- ▶ Des versions affaiblies (avec moins de tour) de PRESENT ont été cassées dès 2007.
- ▶ La version complète l'a été plus récemment (2014, 2015) avec des techniques mathématiques avancées (biclique).

Réseau de Feistel

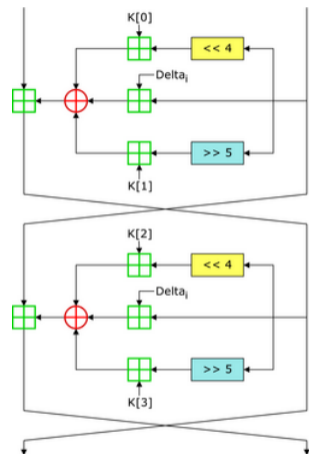
- ▶ Un **réseau de Feistel** est un autre type de structure d'algorithme de chiffrement par bloc sur le modèle itératif.
- ▶ Cette structure permet de construire une fonction F qui soit une permutation à partir de n'importe quelle fonction f .
- ▶ L'idée est de couper en 2 parties égales le message m :
 - \overline{m} la partie gauche, et
 - \overline{m} la partie droite.
- ▶ Ensuite, on peut calculer les c_i du modèle itératif de la manière suivante :
 - $c_0 = (\overline{c_0}, \overline{c_0}) = (\overline{m}, \overline{m})$,
 - $c_{i+1} = (\overline{c_i}, \overline{c_i} \oplus f(k_i, \overline{c_i}))$.
 - $c = c_r$ où r est le nombre de tours.
- ▶ De cette manière on peut déchiffrer même si f n'est pas une permutation :
 - On connaît c , donc on connaît $\overline{c_{r-1}} = \tilde{c}$.
 - On peut calculer $f(k_{r-1}, \overline{c_{r-1}})$.
 - On a que $\overline{c_{r-1}} = \tilde{c} \oplus f(k_{r-1}, \overline{c_{r-1}})$.
- ▶ La robustesse de F dépend directement ici de la robustesse de f (i.e., la difficulté de l'inverser sans connaître k).

- ▶ TEA est un exemple d'algorithme de chiffrement sur le modèle itératif qui a une structure de Feistel.
- ▶ Il est publié par D. Wheeler and R. Needham à FSE en 1994.
- ▶ C'est un algorithme connu pour la simplicité de son implémentation.
 - La taille des blocs est de 64 bits.
 - La clef fait 128 bits.
 - Il fait 64 tours similaires.
- ▶ La structure de haut niveau de TEA est la suivante :

```
1 cl, cr = message_halves(m)
2 k0, k1, k2, k3 = key_quarters(k)
3 for i = 0 to 31 do
4   cl = feistel_round(cr, k0, k1) // round 2*i
5   cr = feistel_round(cl, k2, k3) // round 2*i+1
6 end
```

Fonction de Feistel

- TEA a d'autres particularités que sa préparation de clef :
- l'addition sur les entiers à la place du ou-exclusif pour mixer les deux parties du message,
 - idem pour ajouter les clefs de tours,
 - des décalages et une addition de constante magique (basé sur le nombre d'or) pour la diffusion,
 - des ou-exclusifs pour la confusion.



1 cycle de TEA
= 2 tours de Feistel

- L'algorithme TEA est suffisamment simple que son implémentation complète tienne sur un slide :

```
1 void TEA_encrypt (uint32_t v[2], uint32_t k[4]) {
2     uint32_t v0 = v[0], v1 = v[1];
3     uint32_t k0 = k[0], k1 = k[1], k2 = k[2], k3 = k[3];
4     uint32_t delta = 0x9e3779b9, sum = 0;
5     int i;
6
7     for (i = 0; i < 32; i++) {
8         sum += delta;
9         v0 += ((v1 << 4) + k0) ^ (v1 + sum) ^ ((v1 >> 5) + k1);
10        v1 += ((v0 << 4) + k2) ^ (v0 + sum) ^ ((v0 >> 5) + k3);
11    }
12
13    v[0] = v0;
14    v[1] = v1;
15 }
```

- ▶ TEA souffre de plusieurs faiblesses, il n'est a priori plus utilisé aujourd'hui (remplacé par XTEA puis XXTEA).
- ▶ Notamment, chaque clef possible est équivalente à trois autres.
 - Cela en fait un très mauvais algorithme de hachage !
 - Il a quand même été utilisé de cette manière pour la Xbox, et la faille a été utilisée pour Xbox Linux :

After reading Bruce Schneier's book on crypto, we learned that TEA was a really bad choice as a hash. The book says that TEA must never be used as a hash, because it is insecure if used this way. If you flip both bit 16 and 31 of a 32 bit word, the hash will be the same. We could easily patch a jump in the second bootloader so that it would not be recognized. This modified jump lead us directly into flash memory.

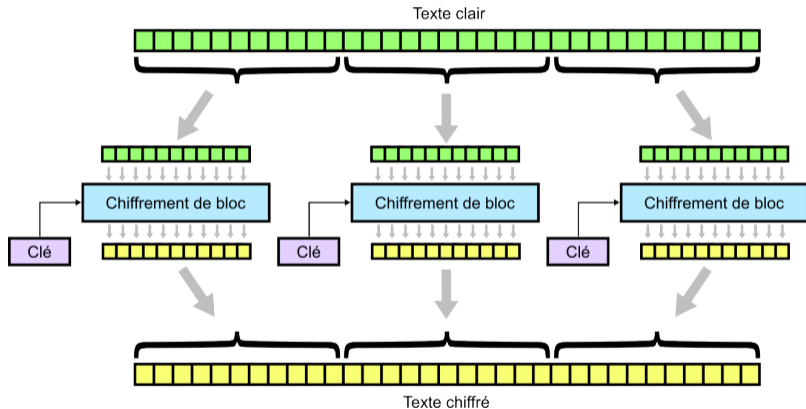
But why did they make this mistake? Obviously the designers knew nothing about crypto - again! - and just added code without understanding it and without even reading the most basic books on the topic. A possible explanation why they chose TEA would be that they might have searched the internet for a "tiny" encryption algorithm - and got TEA.

Modes d'opération

- ▶ Pour chiffrer tout un message avec un algorithme de chiffrement par bloc, on doit utiliser un **mode d'opération**.
- ▶ Ce mode définit comment sont traités les blocs consécutifs du message clair pour effectuer son chiffrement.
- ▶ Il existe plusieurs modes différents, et nous allons en voir quatre intéressants.

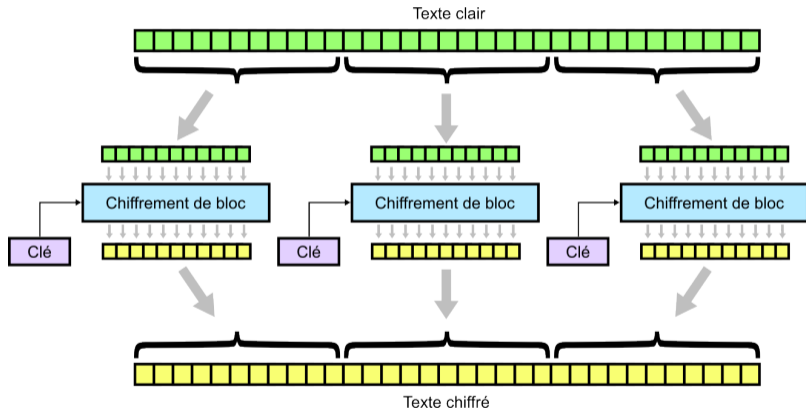
ECB – Electronic Code Book (dictionnaire)

- ▶ Le mode **ECB** est le plus simple : il s'agit simplement de découper le message et de chiffrer chaque bloc indépendamment.



ECB – Electronic Code Book (dictionnaire)

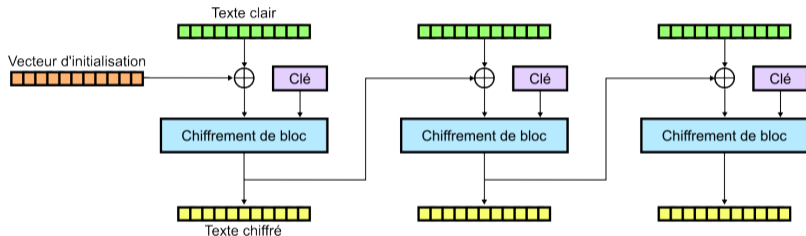
- ▶ Le mode **ECB** est le plus simple : il s'agit simplement de découper le message et de chiffrer chaque bloc indépendamment.



- ▶ Vulnérabilité : un même bloc clair aura toujours le même chiffré.

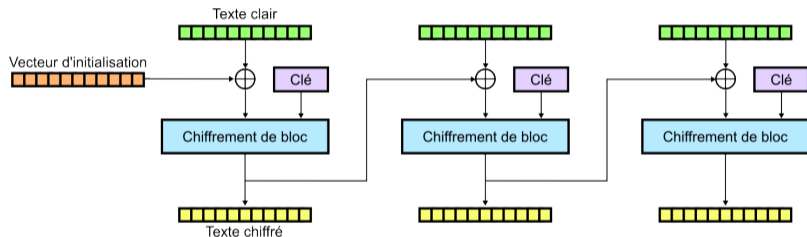
CBC – Cipher Block Chaining (enchaînement)

- Dans le mode **CBC**, on corrige la vulnérabilité de ECB en ajoutant (avec un ou-exclusif) le chiffré du bloc précédent au bloc clair.



CBC – Cipher Block Chaining (enchaînement)

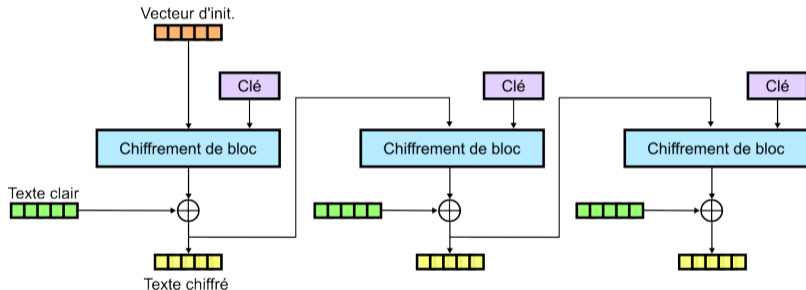
- ▶ Dans le mode **CBC**, on corrige la vulnérabilité de ECB en ajoutant (avec un ou-exclusif) le chiffré du bloc précédent au bloc clair.



- ▶ On ajoute un vecteur d'initialisation pour rendre chaque message unique.

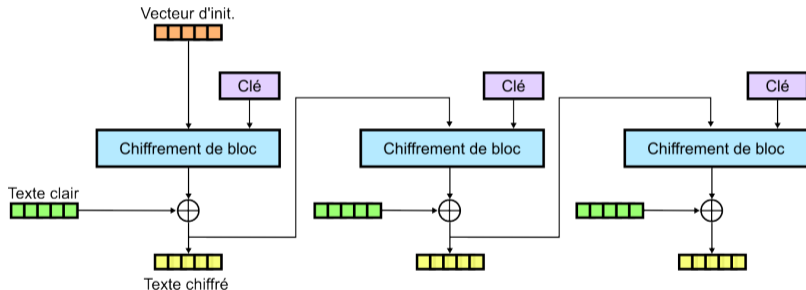
CFB – Cipher Feedback (rétroaction)

- ▶ Le mode CFB transforme un chiffement par bloc en chiffement par flot.
- ▶ Il fait cela en générant un flux de clef à partir du chiffement du précédent bloc chiffré (ou d'un vecteur d'initialisation au début).



CFB – Cipher Feedback (rétroaction)

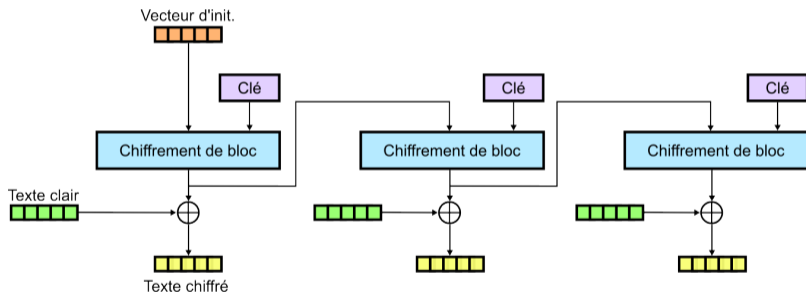
- ▶ Le mode CFB transforme un chiffement par bloc en chiffement par flot.
- ▶ Il fait cela en générant un flux de clef à partir du chiffement du précédent bloc chiffré (ou d'un vecteur d'initialisation au début).



- ▶ Il faut avoir déjà chiffré le bloc précédent pour obtenir la suite du flux de clef.
- ▶ Il n'utilise que la fonction de chiffement du chiffement par bloc.

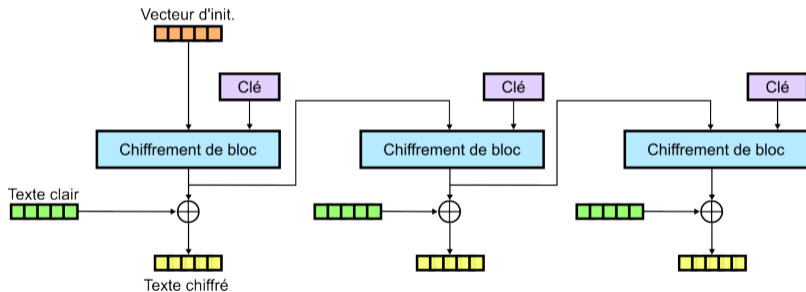
OFB – Output Feedback (rétroaction de sortie)

- ▶ Le mode **OFB** transforme aussi un chiffrement par bloc en chiffement par flot.
- ▶ Cette fois-ci le flux de clef est généré uniquement à partir du vecteur d'initialisation : il ne va être sûr que si la fonction de chiffement avec la clef choisie forment un bon générateur de nombres pseudo-aléatoires.



OFB – Output Feedback (rétroaction de sortie)

- ▶ Le mode **OFB** transforme aussi un chiffrement par bloc en chiffement par flot.
- ▶ Cette fois-ci le flux de clef est généré uniquement à partir du vecteur d'initialisation : il ne va être sûr que si la fonction de chiffement avec la clef choisie forment un bon générateur de nombres pseudo-aléatoires.



- ▶ Un attaquant à clair connu qui a le vecteur d'initialisation peut retrouver la clef.
- ▶ Il permet de pré-calculer le flux de clef.