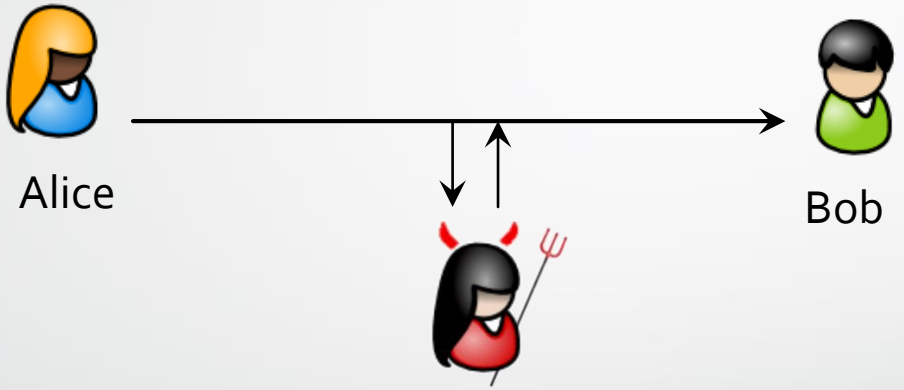
Sécurité et réseaux

Responsable : **Cristina ONETE**

Matériel : https://www.onete.net/teaching.html

Contact : cristina.onete@gmail.com

La cryptographie et la sécurité informatique



- Problème de base : Alice veut communiquer avec Bob
  - **Confidentialité** : l'Adversaire ne voit pas le contenu des messages entre Alice et Bob
  - **Authenticité** : Bob peut être sûr qu'un message qu'il reçoit vient d'Alice
  - **Intégrité** : Bob peut être sûr que le message reçu n'a pas été modifié par personne

La cryptographie met en place des outils pour assurer une communication sécurisée

Des outils cryptographiques variés

- Le chiffrement : assure la confidentialité (optionnellement l'authenticité)
- Les codes MAC, les signatures : assurent l'authenticité de messages
- Les fonctions de hachage : assurent l'intégrité contre un adversaire passif
- Des protocoles :
  - D'authentification
  - D'échange de clés
  - De vote électronique
  - Etc.

Ce module

- 1 CM, 4 TD, 6 TP
- **1 TP noté** (binome) = 25% de votre note
- **Le devoir (CC)** = le dernier TD, 75% de votre note

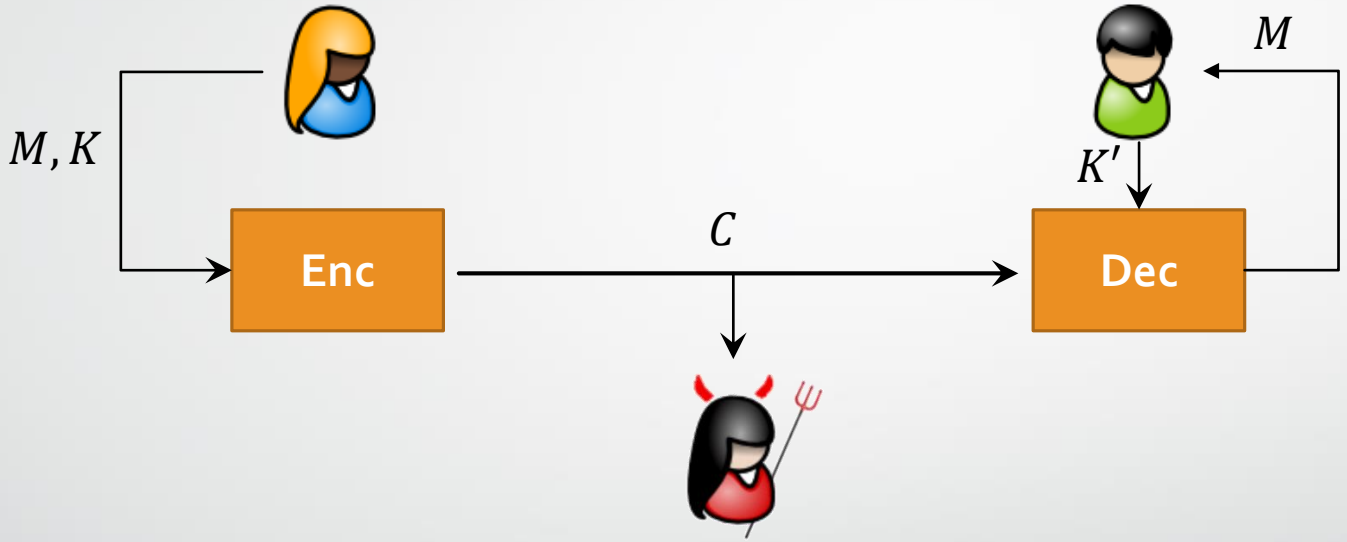
- Les TDs : comprendre les principes d'utilisation de qq. primitives & protocoles
- Les TPs : mettre en pratique vos connaissances crypto

Aujourd'hui

- Le chiffrement en general
- Les schémas de chiffrement à clé symétrique
  - Le chiffrément de César
  - Le schema de Vigènere
  - Le chifrément par bloc
- En TP : Implémentation du schema de Vigènere

Les bases du chiffrement à clé symétrique

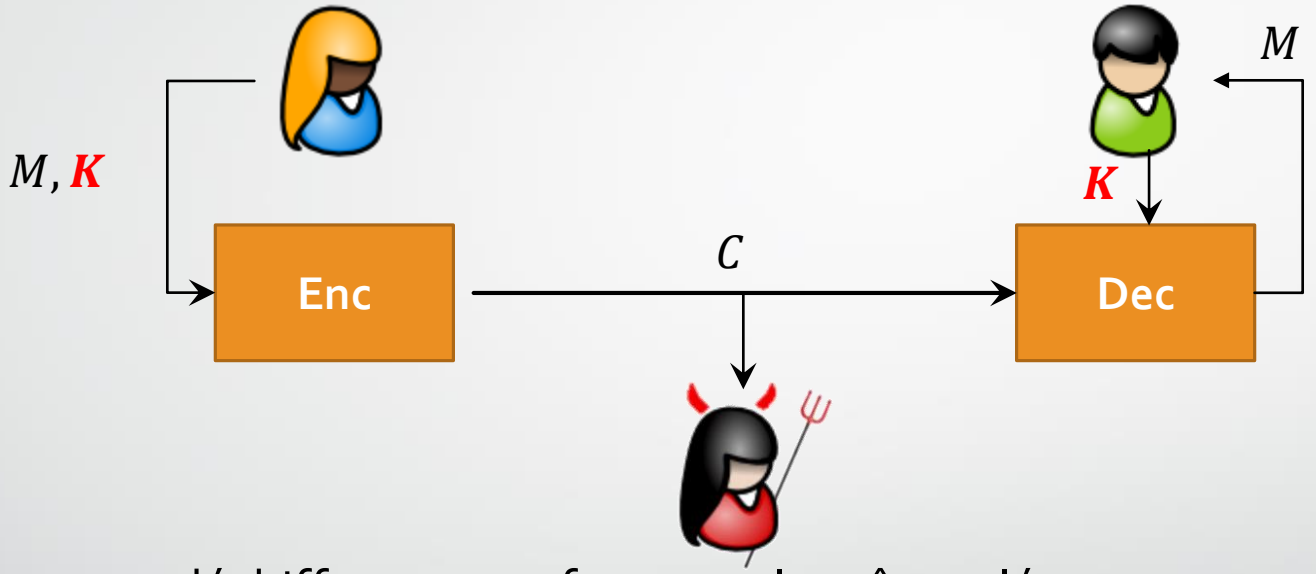
Les schémas de chiffrement : le principe



- Alice chiffre un texte clair (plaintext) M avec une clé K
- Elle obtient et envoie le message chiffré (ciphertext) C à Bob
- Bob déchiffre le chiffré C avec une clé K'
- On veut : 1) que Bob déchiffre C à M avec K'

  2) que C ne donne aucun indice sur M

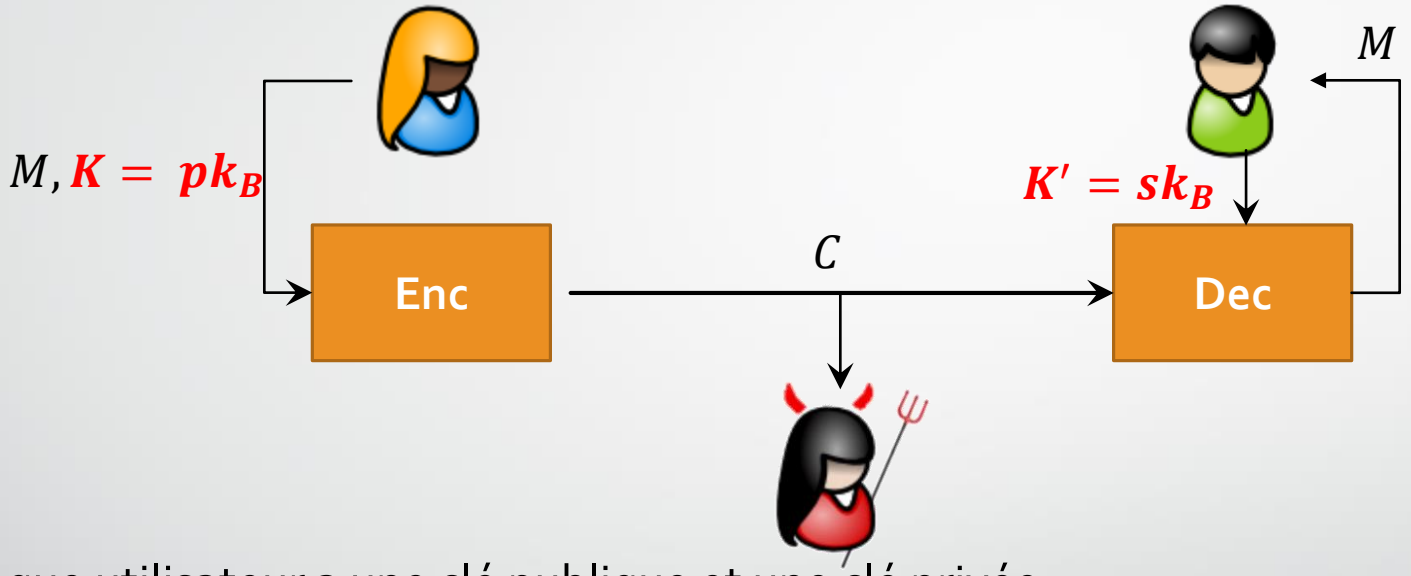
Le chiffrement à clé symétrique



- Le chiffrement et déchiffrement se font avec la même clé
- Attention : cela ne veut pas dire qu'on utilise le même algorithme !
- Le chiffrement est sécurisé tant que l'adversaire n'a aucune information sur la clé K
- Ce type de chiffrement est efficace mais présente aussi des inconvénients

Lesquels ?

Le chiffrement à clé publique



- Chaque utilisateur a une clé publique et une clé privée
- Bob publie sa clé publique
- Alice chiffre son message avec la clé publique de son interlocuteur
- Bob déchiffre avec sa clé secrete
- Le schema fonctionne tant que l'adversaire n'a aucune information sur la clé secrète de Bob

Exemples de chiffrement symétrique

- Le chiffre de César :
  - un système basé sur la permutation
- Principe :
  - chaque lettre de l'alphabet est permutée par un nombre de lettres
  - A→ D, B→ E, C→ F, etc.
- Le chiffre de César est un chiffrement à clé symétrique

Avec quelle clé ?

Chiffrer/Déchiffrer le schema de César

- Equivalance lettres -- chiffres (A→ 0, B → 1, etc.)
- Chiffrer : addition modulo 26 (entre chaque lettre du message clair et la clé)
- Déchiffrer : soustraction modulo 26 (entre chaque lettre du chiffré et la clé)

K = 3

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U

S	T	U	V	W	X	Y	Z
18	19	20	21	22	23	24	25
21	22	23	24	25	1	2	3
V	W	X	Y	Z	A	B	C

La cryptanalyse du chiffre de César

- Cryptanalyse = "casser" le chiffrement en regardant seulement l'algorithme
- Pour le chiffre de César : essayer de déviner la clé
  - Comment peut-on savoir si on a la bonne clé ?
- Attaque par "force brute" (brute force) :
  - Essayer toutes les possibilités jusqu'à trouver la valeur cherchée

Exemple

- Chiffrer/Déchiffrer avec la clé K = 3 :

T	E	X	T	E	C	L	A	I	R
W	H	A	W	H	F	O	D	L	U

- Deviner la clé :
  - Déchiffrer pour toute clé possible
  - Probabilité de succès : 1/26
  - Speed-up : les statistique de la langue (une lettre est toujours chiffrée de la même façon)

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

Les vulnérabilités du chiffre de César

- Un espace de clés très petit (26 possibilités pour un alphabet à 26 lettres)
- Comportement détérministe : lettres chiffrées de la même façon, toujours
- Une solution : le chiffre de Vigènere
  - La clé est un mot (disons de taille l)
  - On interprète chaque lettre de la clé et des messages comme un nombre entre 0 et 25
  - Si le texte clair est plus longue que la clé, on répète la clé
  - On chiffre chaque letter du texte clair avec une lettre de la clé
  - Le chiffrement est une addition mod 26, le déchiffrement est une soustraction mod 26

Le chiffrement/déchiffrement Vigènere

- Chiffrer avec Vigènere :
  - Message : TEXTECLAIR
  - Clé : CLEF
- Même lettre du chiffré ne veut pas dire qu'on a la même lettre dans le texte clair

T 19	E 4	X 23	T 19	E 4	C 2	L 11	A 0	I 8	R 17
2 C	11 L	4 E	5 F	2 C	11 L	4 E	5 F	2 C	11 L
21 **V**	15 **P**	1 **B**	24 **Y**	6 **G**	13 **N**	15 **P**	5 **F**	10 **K**	2 **C**

La cryptanalyse du chiffre de Vigènere

- Vigènere = plus difficile à casser que le chiffre de César
- Cependant, étant donné un chiffré assez longue, on peut le faire
- La méthode de Kasiski :
  - Premier pas : trouver des répétitions dans le chiffré
  - A partir de cela, trouver la taille de la clé
  - Utiliser une attaque par dictionnaire pour trouver la clé

Cryptanalyse sur Vigènere : les répétitions

- Une répétition d'une lettre du chiffré peut être une coincidence
- Mais si un fragment de quelques lettres se repète ?
- Ce qu'on cherche :

T	E	X	T	E	C	L	A	I	R
19	4	23	19	4	2	11	0	8	17
2	11	4	5	2	11	4	5	2	11
C	L	E	F	C	L	E	F	C	L
21	15	1	24	6	13	15	5	10	2
V	P	B	Y	G	N	P	F	K	C

T	E	X	T	E	C	L	A	I	R
19	4	23	19	4	2	11	0	8	17
2	11	4	2	11	4	2	11	4	2
C	L	E	C	L	E	C	L	E	C
21	15	1	21	15	6	13	11	12	19
V	P	B	V	P	G	N	L	M	T

Quelle est la différence entre les deux situations ?

Analyse

- Le même fragment du texte Claire (TE) chiffré avec les mêmes lettres de la clé (CL)
- Ceci veut dire que la distance entre les deux répétitions est un multiple de la taille de la clé
- Quelques répétitions peuvent être une coincidence, mais le plus longue le texte répété, le plus probable qu'il ne s'agit pas d'une coincidence

T	E	X	T	E	C	L	A	I	R
19	4	23	19	4	2	11	0	8	17
2	11	4	2	11	4	2	11	4	2
C	L	E	C	L	E	C	L	E	C
21	15	1	21	15	6	13	11	12	19
V	P	B	V	P	G	N	L	M	T

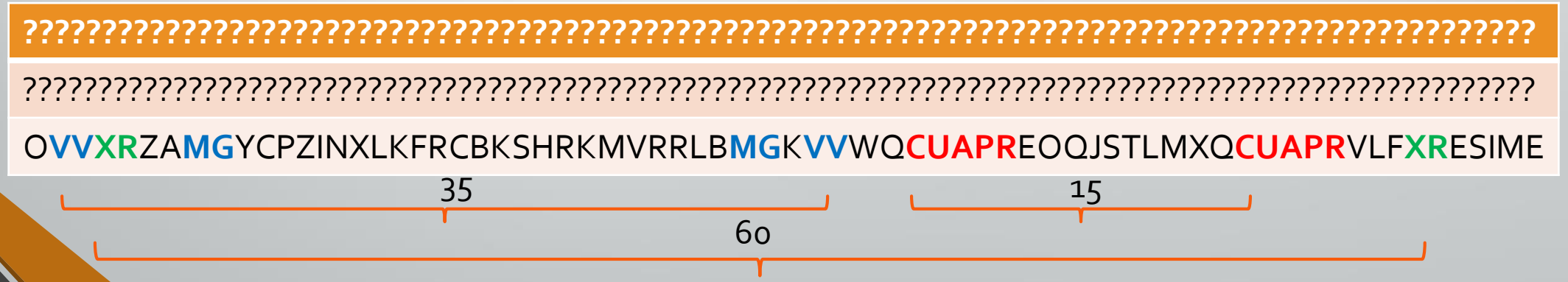
Kasiski : trouver la taille de la clé

- Trouver des répétitions du chiffré
- Les mettre dans une liste : les plus longues en premier
- Mésurer la distance entre les fragments répétés (entre les premières lettres)

??
??
OVVXRZAMGYCPZINXLKFRCBKSHRKMVRRLBMGKVVWQCUAPREOQJSTLMXQCUAPRVLFXRESIME

Kasiski : trouver la taille de la clé

- Trouver des répétitions du chiffré
- Les mettre dans une liste : les plus longues en premier
- Mésurer la distance entre les fragments répétés (entre les premières lettres)
  - 5 lettres (CUAPR) : distance 15
  - 2 lettres : VV, distance 35, XR distance 60, MG distance 26



Kasiski : trouver la taille de la clé

- Trouver des répétitions du chiffré
- Les mettre dans une liste : les plus longues en premier
- Mésurer la distance entre les fragments répétés (entre les premières lettres)
  - 5 lettres (CUAPR) : distance 15
  - 2 lettres : VV, distance 35, XR distance 60, MG distance 26
  - Le plus grand diviseur commun : 1
  - Mais si on enlève 26, on a un diviseur de 5 : ceci indique la taille probable de la clé

??
??
OVVXRZAMGYCPZINXLKFRCBKSHRKMVRRLBMGKVVWQCUAPREOQJSTLMXQCUAPRVLFXRESIME

Cryptanalyse de Viginère

- 1) Méthode de Kasiski : trouver la taille de la clé
- 2) Utiliser une attaque par dictionnaire pour trouver la clé
  - Ceci veut dire essayer tous les mots d'un dictionnaire en déchiffrant à chaque fois pour trouver une solution
  - Comment sait-on quand il faut s'arrêter ?
- 3) Speed-up pour 2) : voire les statistiques de la langue -- e.g. la méthode de l'index de coincidence https://en.wikipedia.org/wiki/Index_of_coincidence

Les faiblesses de Vigènere

- Quelles conditions favorisent la cryptanalyse de Vigènere ?

a) taille du chiffré ?

b) taille de la clé ?

c) des répétitions au niveau du texte clair ?

d) la langue du texte clair ?

e) le contenu du texte clair ?

f) les informations concernant le texte de l'adversaire ?

g) autre chose ? (Notamment … ?)

Le chiffrement ideal et les chiffres par bloc

Un chiffre parfait

- Idéalement le chiffrement devrait "cacher" le texte clair complètement
- Ce type de chiffrement existe : le chiffement à masque unique (one-time pad)
- Principe :
  - A chaque chiffrement, choisir une clé aléatoire et chiffrer
  - La clé doit impérativement être aléatoire, unique, et de la même taille que le message

Le chiffrement à masque unique

- En général sur un alphabet binaire ($\{0,1\}$)
- Le chiffrement : l'opération de XOR (OR exclusif) = addition mod 2
- Mais on peut voir mieux sur un alphabet à 26 charactères
  - Le chiffrement = l'addition modulo 26
- Générer la clé : choisir chaque lettre de la clé aléatoirement, jusqu'à avoir une clé de la taille indiquée

B	L	O	C	K	C	I	P	H	E	R
P	R	Z	A	N	I	B	Q	T	C	S
R	C	N	D	Y	L	K	F	A	H	J

Meilleur attaque contre un tel chiffre

- Si la clé est non-aléatoire : utiliser les statistiques de la langue
- Si la clé est aléatoire mais se répète :
  - Etant donné $c_1 = m_1 \; XOR \; k$ et $c_2 = m_2 \; XOR \; k$ nous trouvons $m_1 XOR \; m_2 = c_1 \; XOR \; c_2$
  - Puis on utilise des statistiques pour trouver les mots
- Si la clé est aléatoire mais se répète, nous ne pouvons pas distinguer le texte clair d'un autre texte clair de la même taille !
  - **BLOCKCIPHER** + "**PRZANIBQTCS**" = RCNDYLKFAHJ
  - **UNIVERSALLY** + "**XOEHUUSEPWO**" = RCNDYLKFAH
  - **YETIMONSTER** + "**TYUVLXXNGCS**" = RCNDYLKFAHJ

Les inconvenients de ce chiffre

- Est-ce qu'on utilize le chiffrement à masque unique dans la vraie vie ?
- Pourquoi pas ? Quels sont ses inconvenients selon vous ?

Le chiffrement symétrique moderne

- Deux types de méthodes : les chiffres par bloc et les chiffres par flot
- Le chiffrement par bloc :
  - Diviser le messages en plusieurs blocs d'une certaine taille
  - Chaque bloque chiffré avec un schéma (par exemple AES)
  - A partir des chiffrés des blocs, obtenir le chiffré final (mode d'opération)
- Le chiffrement par flot :
  - Générer une masque pseudo-aléatoire
  - Utiliser le chiffrement de type OTP pour un flot de messages

L'algorithme AES (variante Rijndael)

- Dévelopé par Vincent Rijmen et Joan Daemen en 1998
- Opère sur des blocs de 128 bits avec une clé de taille variable (128, 192 ou 256)
- Le chiffrement de chaque bloc se fait en tours (rounds)
  - Le nombre de tours est 10, 12 ou 14, en function de la taille de clé
  - Une clé plus longue permet plus de tours
- 4 opérations sur chaque bloc :
  - SubBytes, ShiftRows, MixColumns -- sans utiliser la clé
  - AddRoundKey -- avec la clé

Structure du chiffrement

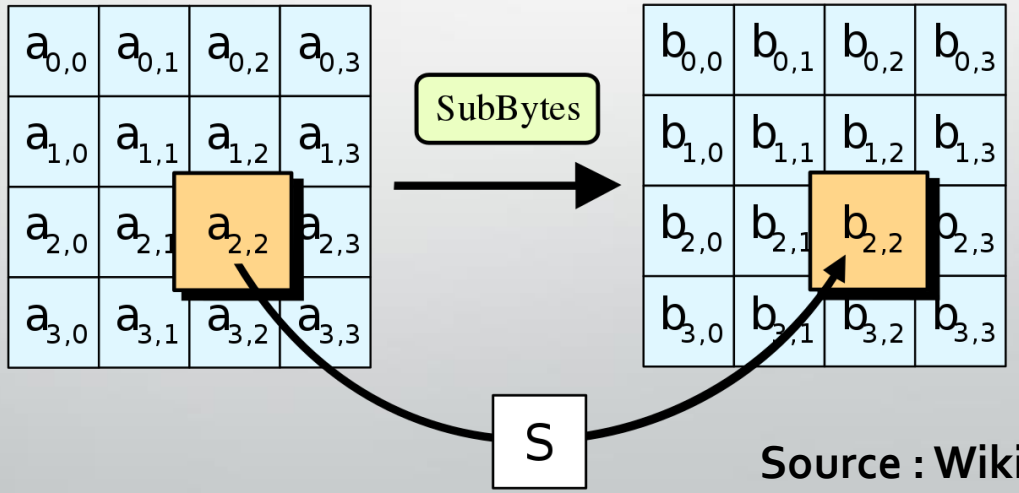
Input : 128 bits de texte clair, = 16 octets

1. **L'expansion de clé** : à partir de la clé, obtenir une clé pour chaque tour + 1
2. **Première addition de clé** : on fait l'XOR du bloc avec la clé
3. **Les premiers tours** (9/10, 11/12, 13/14) :
   - SubBytes, ShiftRows, MixColumns, AddRoundKey
4. **Le dernier tour** :
   - SubBytes, ShiftRows, AddRoundKey

Output : 128 bits de chiffré

SubBytes

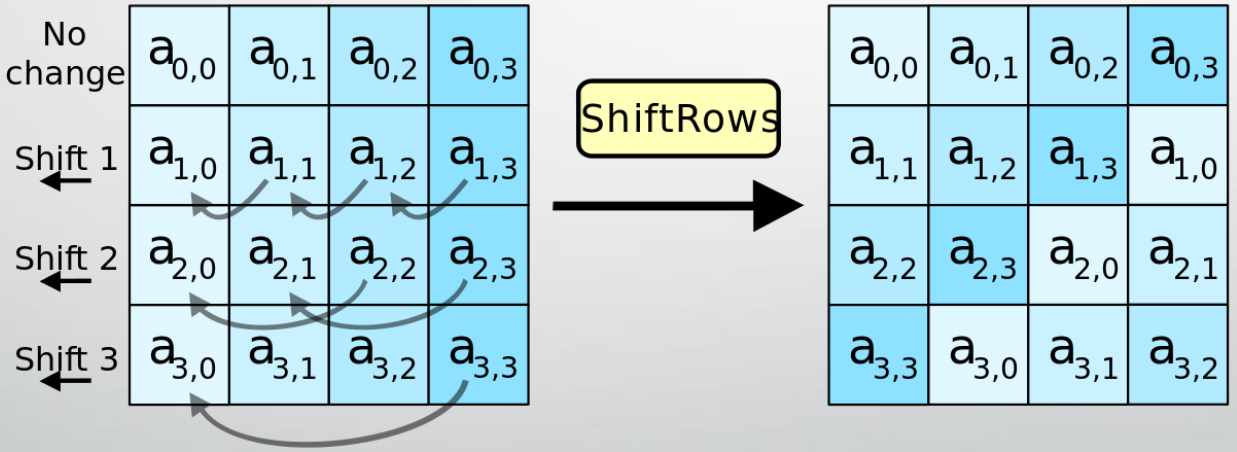
- La seule opération non-lineaire
- On soustitue des octets du message par d'autres octets, selon un tableau S



Source : Wikipedia.org

ShiftRows

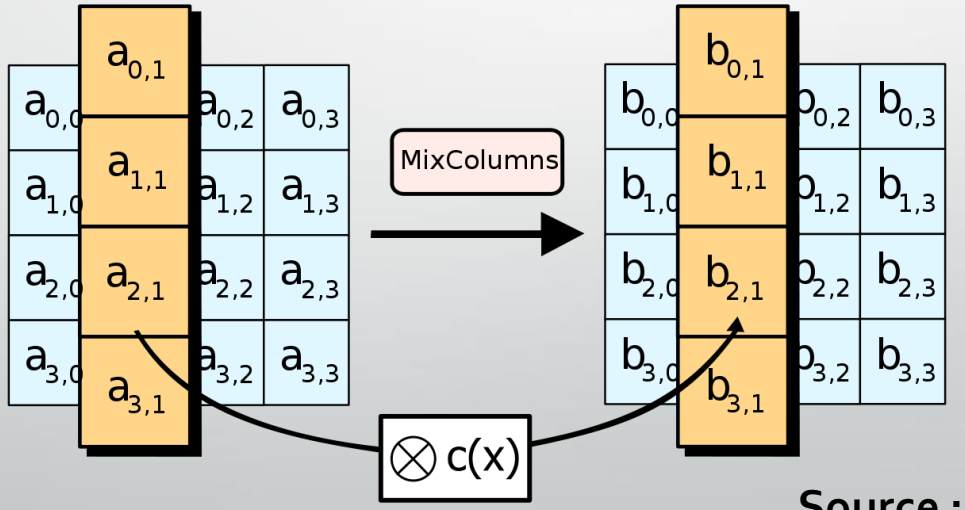
- Décale les éléments de chaque rang par un nombre variable de positions



Source : Wikipedia.org

MixColumns

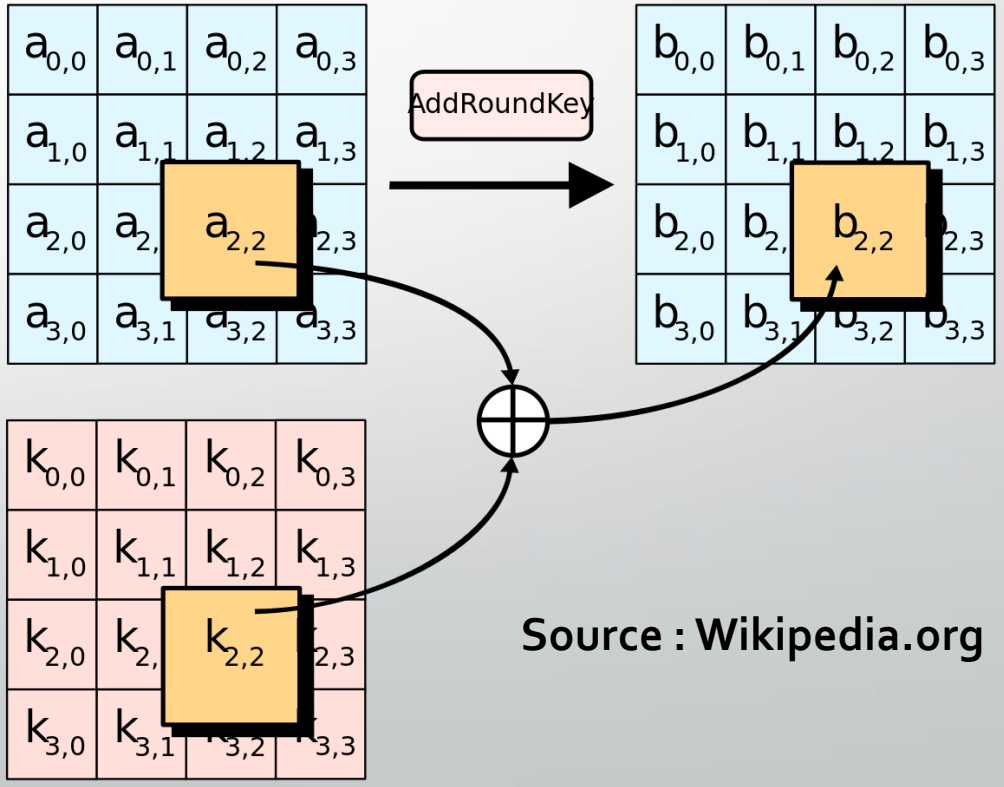
- Utiliser une transformation lineaire (donnée par une matrice 4 x 4) pour transformer chaque colonne



Source : Wikipedia.org

AddRoundKey

- En utilisant XOR on combine la matrice d'octets avec la clé du tour



Source : Wikipedia.org

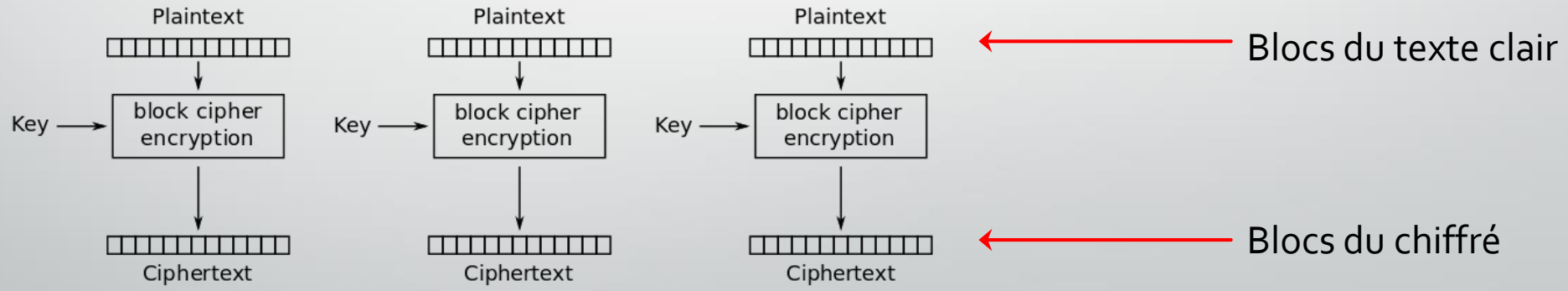
La sécurité d'AES

- A ce jour, AES reste le meilleur chiffre par bloc qu'on connait
- Les seules attaques qu'on connait exploitent :
  - Soit des faiblesses d'implementation (attaques par des canaux auxiliaires)
  - Soit des faiblesses de choix de clé (related-key attacks)
- Attention : ceci est vrai pour le chiffrement de chaque bloc, individuellement

Comment chiffrer des messages à plusieurs blocs ?

Le mode d'opération d'un chiffre par bloc

- Indique comment les chiffrés des blocs individuelles donnent le chiffré final
- Un mauvais mode d'opération peut casser la sécurité du chiffré obtenu
  - Malgré la sécurité du schéma de chiffrement utilisé

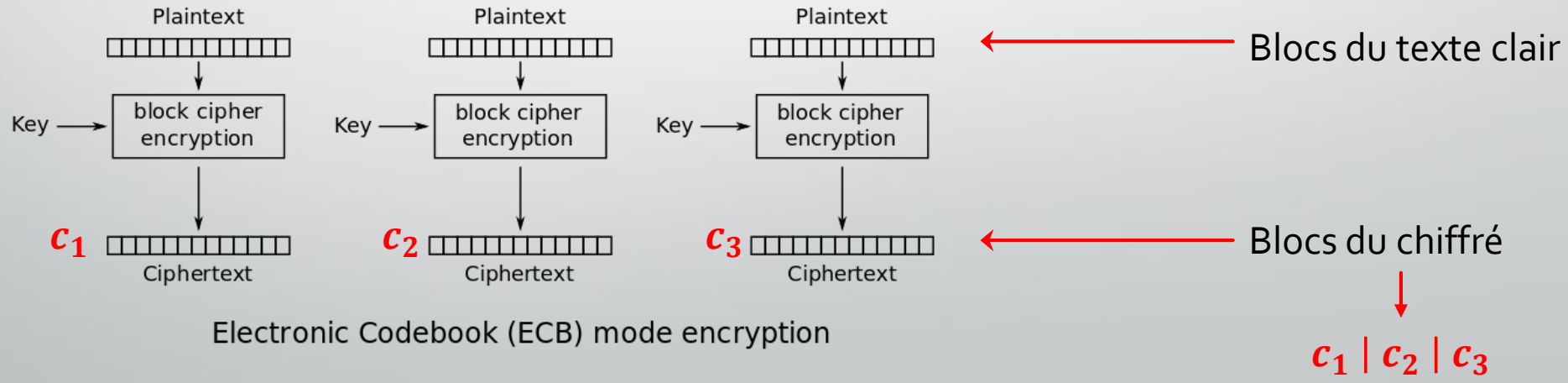


Electronic Codebook (ECB) mode encryption

Source : Wikipedia.org

Le mode d'opération d'un chiffre par bloc

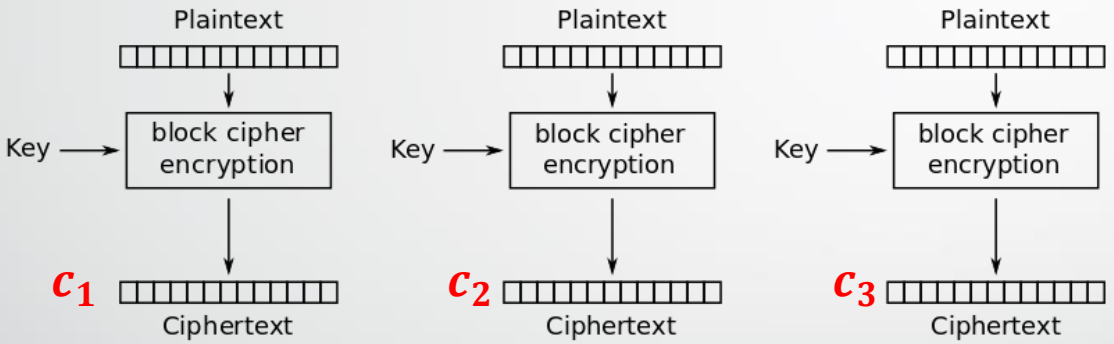
- Indique comment les chiffrés des blocs individuelles donnent le chiffré final
- Un mauvais mode d'opération peut casser la sécurité du chiffré obtenu
  - Malgré la sécurité du schéma de chiffrement utilisé



Electronic Codebook (ECB) mode encryption

Source : Wikipedia.org

Problèmes du mode ECB



Electronic Codebook (ECB) mode encryption

Blocs du texte clair

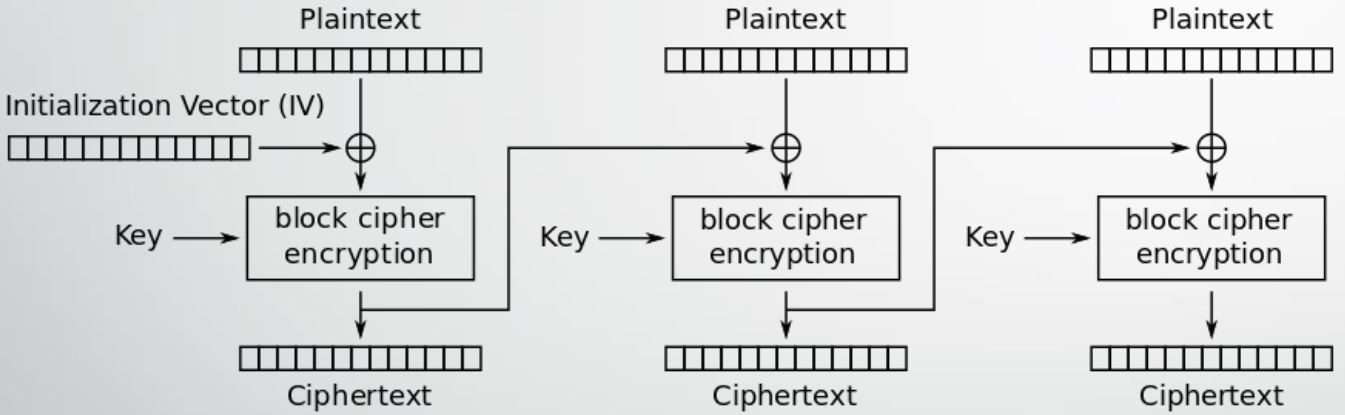
Blocs du chiffré

$c_1 \mid c_2 \mid c_3$

Source : Wikipedia.org

- Ce mode d'opération n'est pas du tout sécurisé **Pourquoi pas ?**

Le mode CBC



Cipher Block Chaining (CBC) mode encryption

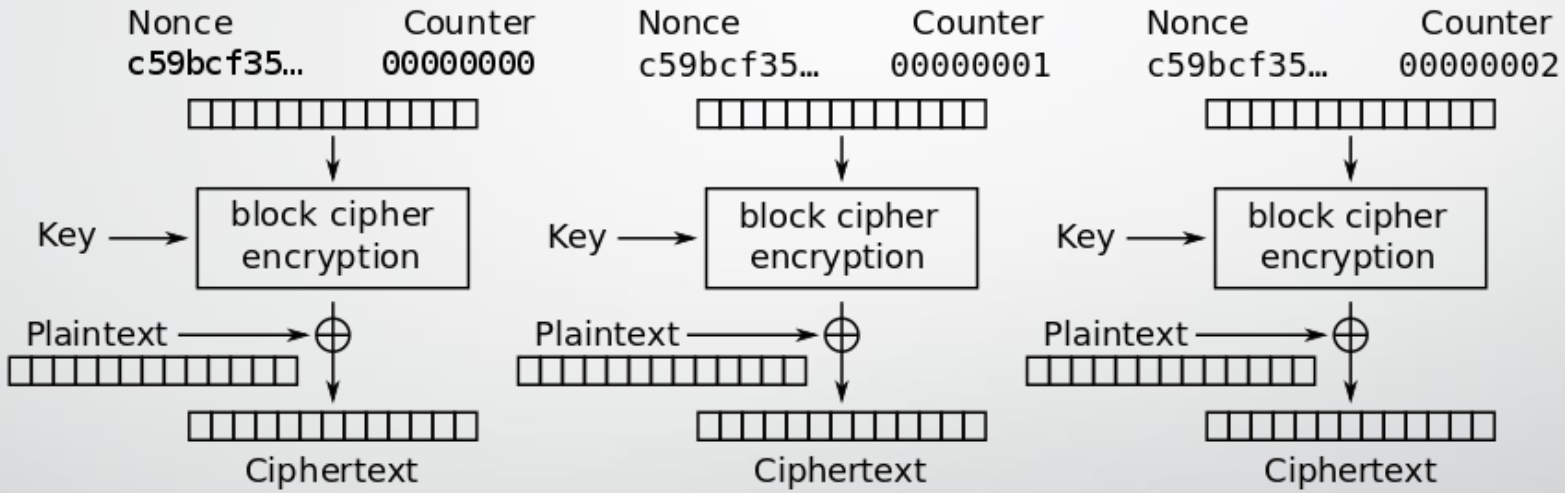
Blocs du texte clair

Bloc final = le chiffré

Source : Wikipedia.org

Mieux que ECB, mais moins populaire à cause des attaques contre une utilisation particulière dans le protocole TLS/SSL

Le mode compteur (CTR)

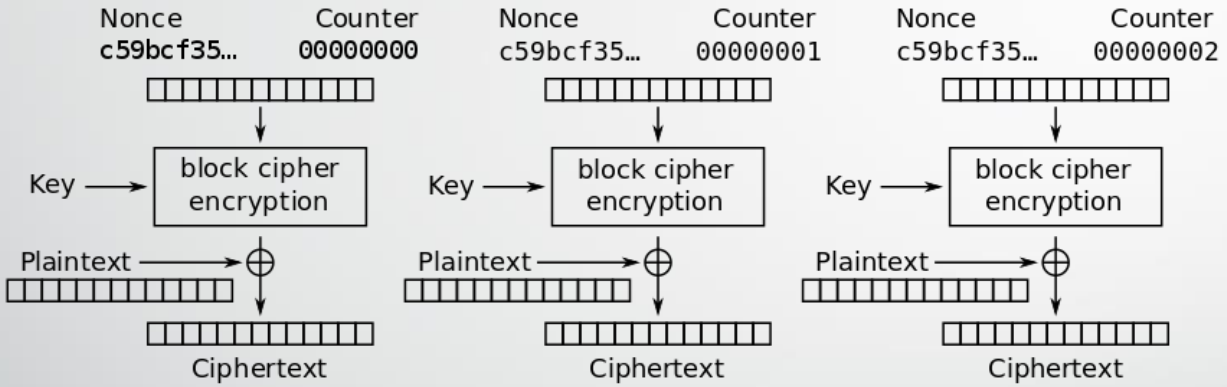


Counter (CTR) mode encryption

Source : Wikipedia.org

Le mode le plus utilisé actuellement est le mode GSM, une variante du mode CTR

Le mode compteur (CTR)



Counter (CTR) mode encryption

Blocs du texte clair

Blocs du chiffré

$c_1 \mid c_2 \mid c_3$

Source : Wikipedia.org

Qu'est-ce que a change par rapport au mode ECB ?