ISIFC 3, Crypto Chiffrement Symétrique

Jean-François Couchot
Université de Franche-Comté, UFR-ST

Plan

Plan

Plan

La cryptographie

Définition et historique

Définition (Cryptographie)

La cryptographie («kryptos» caché, «graphein» écriture) est l'ensemble des techniques (algorithmes et protocoles) permettant de protéger un message

Historique : un art ancien et une science nouvelle

- 5 siècle avant J.C., Spartiates : utilisation de scytales
- Chiffre de César : décalage alphabétique
- 1580 : chiffre par substitution de symboles – Marie Stuart
- 1586 : traité des chiffres – Chiffre de Vigenère
- 1930 : enigma
- Fin 20ème : apparition du chiffrement à clé publique – RSA en 1977

La cryptographie

Formalisation

Notations

Le message en clair M est transformé en message chiffré C (*ciphertext*) via la fonction de chiffrement E (*encrypt*) et la clef K (*key*)

$$C = E(M, K)$$

Le message chiffré C est transformé en message en clair M via la fonction de déchiffrement D (*decrypt*) et la clef K^{-1} (qui peut être égale à K)

$$M = D(C, K^{-1})$$

La cryptanalyse

Définition

Définition (Cryptanalyse)

La *cryptanalyse* (analyse du secret) est la science qui consiste à tenter de trouver un message ayant été protégé par une technique de cryptographie

Des techniques diverses et variées

- Attaque par force brute
- Analyse fréquentielle, linéaire, différentielle, ...
- ...

Classes d'attaques

- *ciphertext-only* : Oscar connaît uniquement un chiffré C
- *known-plaintext* : Oscar connaît un message M et le chiffré C associé
- *chosen-plaintext* : Oscar choisit un message M ...
- *chosen-ciphertext* : Oscar choisit un chiffré C et obtient M associé

Chiffre, chiffrement, déchiffrement : vocabulaire

Définition (Chiffre)

Un chiffre est un code secret permettant de transcrire un texte clair (libellé) en un texte chiffré (cryptogramme), généralement à l'aide d'une clef de chiffrement

Définition (Chiffrement)

Le chiffrement est la réalisation de cette transcription. On chiffre

Définition (Déchiffrement)

Le déchiffrement est l'opération inverse du chiffrement. On déchiffre

Définition (Décryptage)

Le décryptage consiste à trouver un texte clair à partir d'un texte chiffré, sans la clef de chiffrement. On décrypte. *Cryptage* et *crypter* n'existent pas !

Définition (Cryptologie (science du secret))

La *cryptologie* est l'ensemble constitué de la cryptographie et de la cryptanalyse

Plan

Principe de Kerckhoffs [1]

Principe de Kerckhoffs

1. Un cryptogramme ne doit pas pouvoir être déchiffré sans la clé
2. Les clés doivent être simples et modifiables
3. Les cryptogrammes doivent être transportables, c'est-à-dire "télégraphiables"
4. L'appareil de codage et les documents doivent être transportables
5. Le système doit être simple d'utilisation
6. Le système de chiffrage doit être au préalable examiné par des experts

1. La cryptographie militaire, dans *Journal des sciences militaires*, Auguste Kerckhoffs, 1883

Maxime de Shannon [2]

Maxime de Shannon

«L'adversaire connaît le système.»

Dit autrement...

- La sécurité repose sur le secret de la clef et non sur le secret de l'algorithme
- Le déchiffrement sans la clef doit être impossible
- Trouver la clef à partir du texte clair et du texte chiffré est impossible

Confusion et diffusion

- *Confusion* : relation la plus complexe possible entre la clef de chiffrement et le cryptogramme
- *Diffusion* : dissipation de la redondance statistique d'un texte clair dans le cryptogramme Un bit changé en entrée doit changer chaque bit en sortie avec une probabilité $\frac{1}{2} \rightarrow$ effet d'avalanche

2. *Communication Theory of Secrecy Systems*, Claude Shannon, 1949

Ordres de grandeur

Puissance des ordinateurs

La puissance d'un PC actuel (en 2021) est d'environ 2,4M Mips (millions d'instructions par secondes).

Temps (secondes)

2^{10}	15 minutes	
2^{20}	10 jours	
2^{30}	30 ans	
2^{40}	30000 ans	découverte du feu
2^{50}	30M années	extinction des dinosaures [3]
2^{57}	4Md années	âge de la Terre
2^{59}	13Md années	âge de l'Univers

3. 65M années

Plan

Plan

Chiffre de Vernam, principe, propriété

Message M et clef K parfaitement aléatoire et de même longueur

- Le message chiffré C est : $C = M \oplus K$
- Déchiffrement : $M = C \oplus K$
- La clef K : jetée après le chiffrement (appelé aussi masque jetable)

Chiffrement inconditionnellement sûr

- Comme la clef est parfaitement aléatoire, toute clef est équiprobable, et donc elle n'apporte aucune information au message
- La relation entre le texte clair, le texte chiffré et la clef ne permet pas d'obtenir d'information
- On en déduit, que la connaissance du texte chiffré n'apporte aucune information sur le texte clair

Conséquences

- Attaque par force brute : impossible de trouver le texte original !
- Mais clef aussi longue que le message à transmettre : intérêt ?

Plan

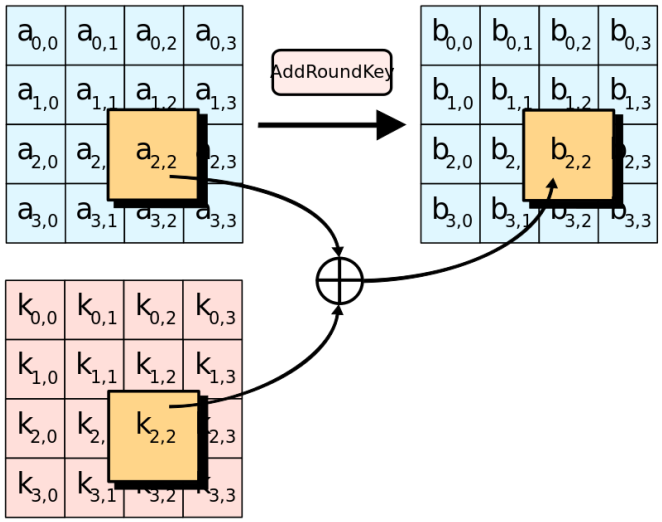
AES [4] : chiffrement par bloc de 128b.

Chiffrement pr. clef K de 128b. et message M de taille multiple de 128b.

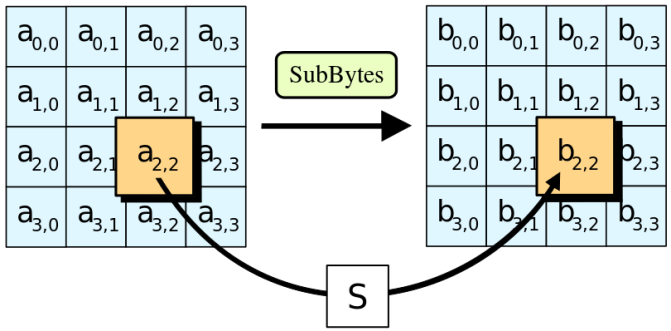
1. Message M et clef K : comme des tableaux 4×4 B.
2. KeyExpansion : génération des 11 clefs $K^0 \ldots, K^{10}$ de 128b
3. Préliminaire : AddRoundKey sur l'état initial $XOR(a^0, K^0)$
4. Pour t de 0 à 8 :
   - 4.1 SubBytes : $\forall i, j$, application d'une fonction $a^t_{i,j} = S(a^t_{i,j})$ non linéaire
   - 4.2 ShiftRows : décalage des cellules, ligne par ligne $a^t_i = a^t_i << i$
   - 4.3 MixColumns : produit matriciel, colonne par colonne $a^t_j = C.a^t_j$
   - 4.4 AddRoundKey $a^{t+1} = XOR(a^t, K^{t+1})$
5. Tour final :
   - 5.1 SubBytes
   - 5.2 ShiftRows
   - 5.3 AddRoundKey $a^{10} = XOR(a^9, K^{10})$

4. Daemen, Joan, & Rijmen, Vincent (2002). The design of Rijndael : AES-the advanced encryption standard. In Information Security and Cryptography. springer.

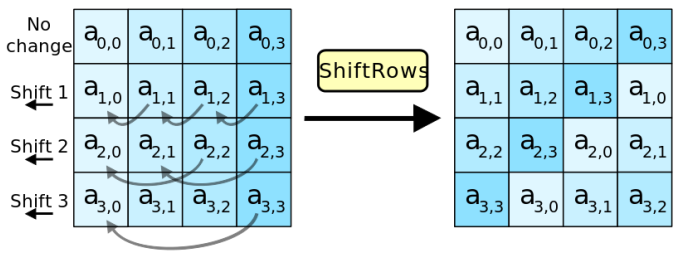
AES : en schéma [5]



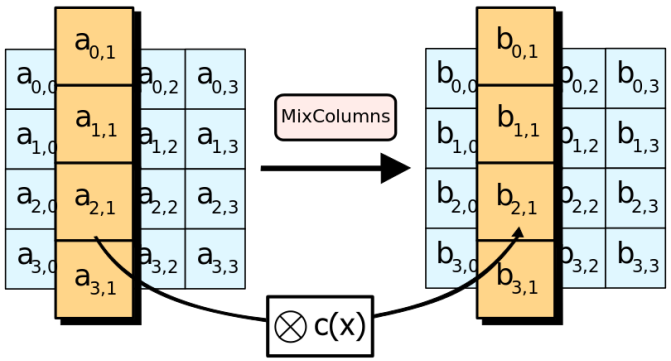
AddRoundKey



SubBytes



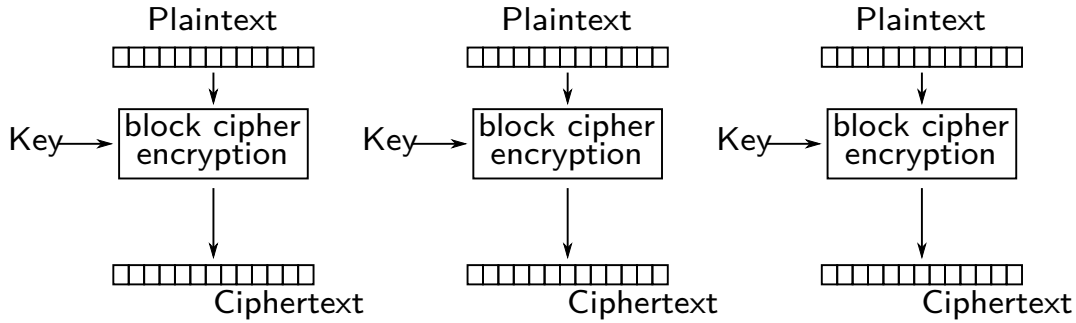
ShiftRows



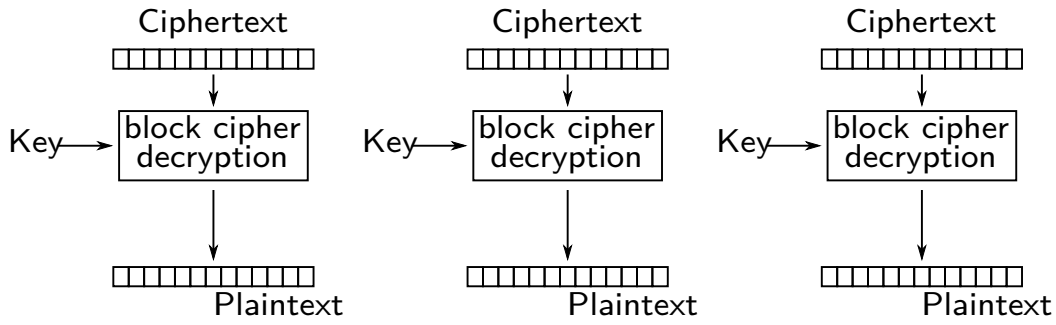
MixColumns

5. https ://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Encryption_Standard

Mode Electronic CodeBook (ECB) [6]



Electronic Codebook (ECB) mode encryption

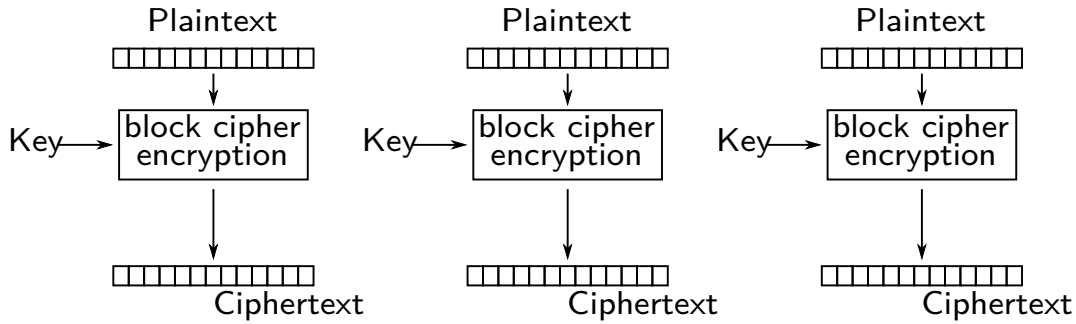


Electronic Codebook (ECB) mode decryption

- Chaque bloc de 128b. chiffré séparément : $C_i = E(M_i, K)$
- Chaque bloc de 128b. déchiffré séparément : $M'_i = D(C_i, K)$

6. `https://en.wikipedia.org/wiki/Block_cipher_mode_of_operation`

Mode ECB : analyse du cas d'école



Electronic Codebook (ECB) mode encryption

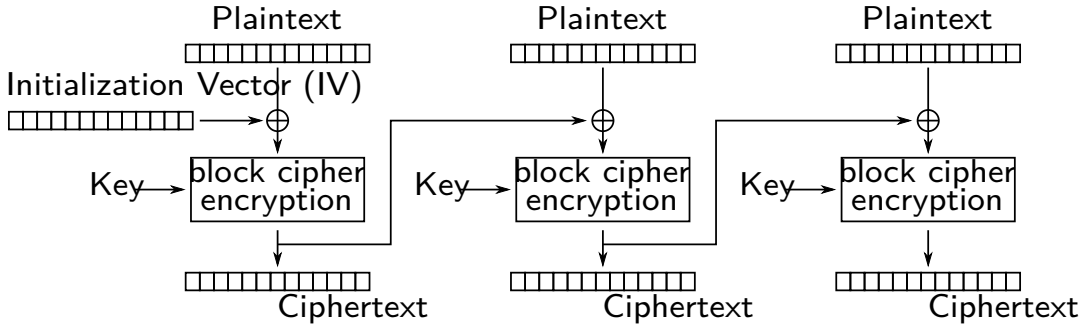
Inconvénients $\rightsquigarrow$ ne PAS utiliser

- Taille du message nécessairement multiple de 128b ? Solution ?
- 2 blocs identique $M_1 = M_2 \rightsquigarrow$ chiffrés identiques $C_1 = C_2$

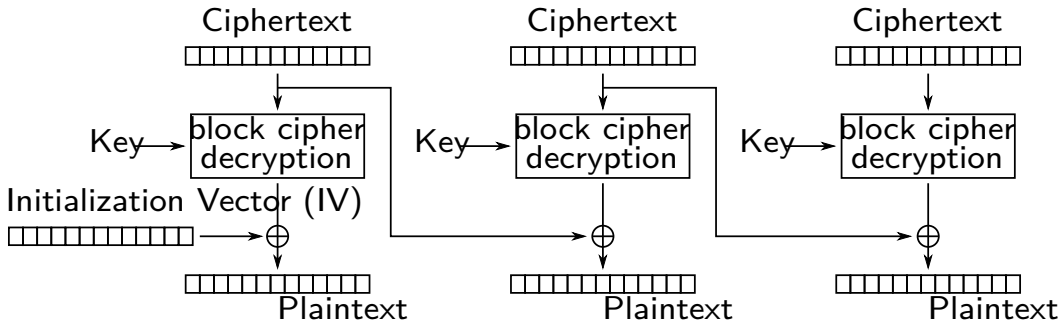
Exemple : chiffre d'une image régulière

ISIFC
génie biomédical

Mode Cipher Block Chaining [7] (CBC)



Cipher Block Chaining (CBC) mode encryption

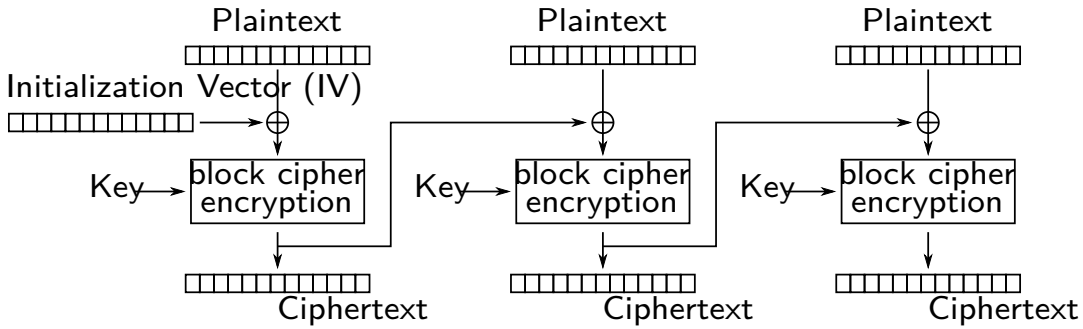


Cipher Block Chaining (CBC) mode decryption

- IV : vecteur d'initialisation, partagé en clair
- Mélange de chaque bloc M_i avec le chiffré C_{i-1} précédent : $C_0 = IV$ puis $C_i = E(M_i \oplus C_{i-1}, K)$
- Déchiffrement : $C_0 = IV$ puis $M'_i = D(C_i, K) \oplus C_{i-1}$

7. William F. Ehrsam, Carl H. W. Meyer, John L. Smith, Walter L. Tuchman, "Message verification and transmission error detection by block chaining", US Patent 4074066, 1976.

Mode CBC : analyse de cette amélioration



Cipher Block Chaining (CBC) mode encryption

Inconvénients, avantages

- \- Pas parallélisable ; 1 seul bit de changé dans M_1 $\rightsquigarrow$ tout recalculer
- $+$ Meilleure diffusion qu'ECB ; IV erroné au déchiffrement $\rightsquigarrow$ seul M_1' est faux

Exemple : chiffre d'une image régulière

ISIFC
Génie Biomédical

Mode CBC : code avec pycryptodome

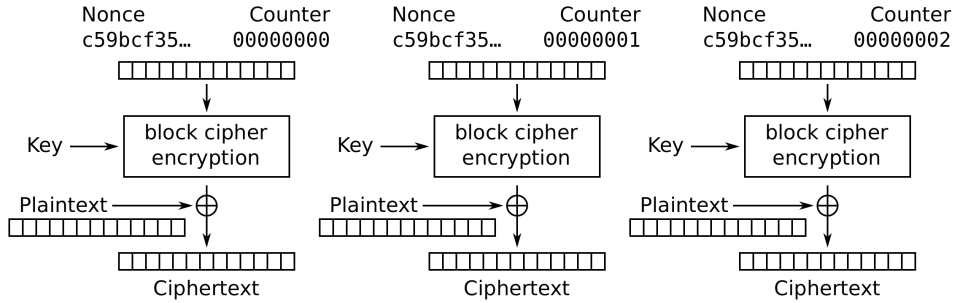
```python
from base64 import b64encode
from Crypto.Cipher import AES
from Crypto.Util.Padding import pad
from Crypto.Random import get_random_bytes

data = "isifc".encode('utf-8')
key = get_random_bytes(16)
with open(path+'aeskey','wb') as f:
   f.write(key)

cipher = AES.new(key, AES.MODE_CBC)
ct_bytes = cipher.encrypt(pad(data, AES.block_size))

iv = b64encode(cipher.iv).decode('utf-8')
ct = b64encode(ct_bytes).decode('utf-8')

json_string = json.dumps({'iv':iv, 'ciphertext':ct})
with open(path+'json_data.json', 'w') as outfile:
   outfile.write(json_string)
print(json_string)
```

```
{ "iv": "c0zSOIKdI51Yy6GrL7BGUQ==",
  "ciphertext": "EQ8KaZnFYPKRywZ1YpTTZA=="}
```

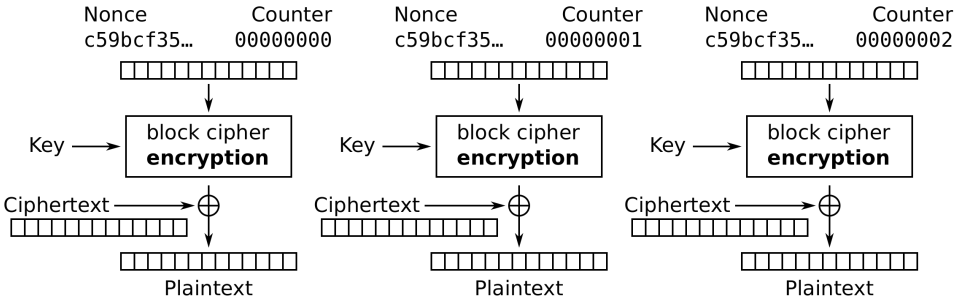
```python
import json
from base64 import b64decode
from Crypto.Cipher import AES
from Crypto.Util.Padding import unpad

with open(path+'aeskey', 'rb') as f:
    key = f.read()

with open(path+'json_data.json') as json_file:
    b64 = json.load(json_file)

iv = b64decode(b64['iv'])
ct = b64decode(b64['ciphertext'])
cipher = AES.new(key, AES.MODE_CBC, iv)

pt = unpad(cipher.decrypt(ct), AES.block_size)
print("The message was: ", pt.decode('utf-8'))
```

```
The message was:  isifc
```

Mode CounTeR (CTR) : Diffie, Hellman 1979



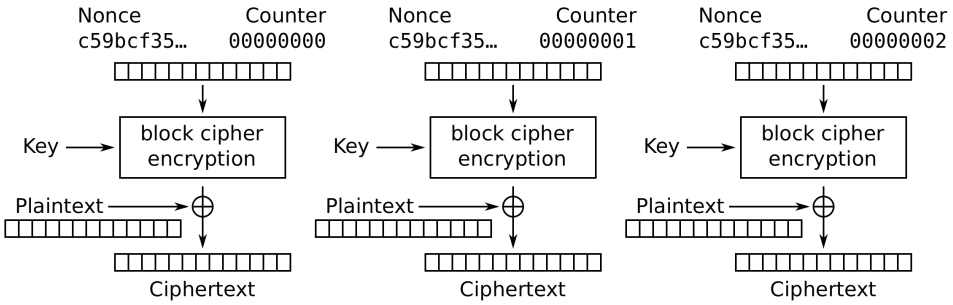
Counter (CTR) mode encryption



Counter (CTR) mode decryption

- Nonce $\leftrightarrow$ IV : vecteur d'initialisation, comme ds CBC
- Mélange XOR du chiffrement de $(\texttt{Nonce}||\texttt{Counter})$ selon K avec M_i : $C_i = E((\texttt{Nonce}||\texttt{Counter}_i), K) \oplus M_i$
- Déchiffrement : $M'_i = E((\texttt{Nonce}||\texttt{Counter}_i), K) \oplus C_i$

Mode CTR : analyse de cette amélioration



Counter (CTR) mode encryption

Inconvénients, avantages

- \- IV erroné $\rightsquigarrow$ tout M' est faux
- $+$ Parallélisable ;

Exemple : chiffre d'une image régulière

ISIFC
Génie Biomédical

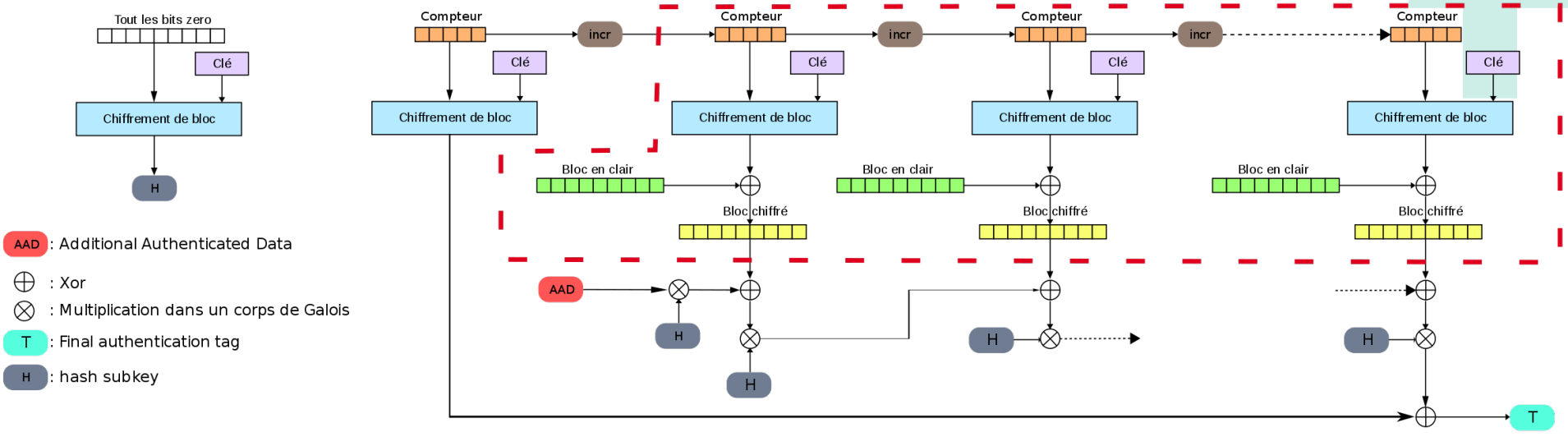
Modes combinant intégrité et confidentialité

Motivation

- Modes précédents : confidentialité mais pas intégrité (impossible pour le · la destinataire d'établir si le message chiffré a été modifié)
- Apparition d'une autre famille de modes opératoires (2003) AEAD (Authenticated Encryption with Associated Data) combinant chiffrement et intégrité en une primitive unique
- Galois/Counter Mode (GCM), Counter with CBC-MAC (CCM)
- Nécessité de transférer en + des données pour l'intégrité

Galois/Counter Mode (GCM)

Chiffrement en image [8]



Analyse

- Intégrité : génération d'un TAG d'authentification à partir de d'AAD
- Inconvénients, avantages algorithmiques : comme CTR

8. https://fr.wikipedia.org/wiki/Galois/Counter_Mode

Mode GCM : code avec pycryptodome

```python
import json
from base64 import b64encode
from Crypto.Cipher import AES
from Crypto.Util.Padding import pad
from Crypto.Random import get_random_bytes

data = "isifc".encode('utf-8')
header = "entête".encode('utf-8')
key = get_random_bytes(16)
with open(path+'aeskey','wb') as f:
    f.write(key)
cipher = AES.new(key, AES.MODE_GCM)
cipher.update(header)

ciphertext, tag = cipher.encrypt_and_digest(data)

json_k = [ 'nonce', 'header', 'ciphertext', 'tag' ]
json_v = [ b64encode(x).decode('utf-8')
    for x in (cipher.nonce, header, ciphertext, tag)]

json_string = json.dumps(dict(zip(json_k, json_v)))
with open(path+'json_data.json', 'w') as outfile:
    outfile.write(json_string)
print(json_string)
```

```
{"nonce": "TRzMWR11WUKqAaIJDmDfSw==",
  "header": "ZW50w6p0ZSBxdWVsY29ucXVl",
  "ciphertext": "BvP9JVE=",
  "tag": "fMd65haAYwdEptYGm7t8Tg==}
```

```python
import json
from base64 import b64decode
from Crypto.Cipher import AES

with open(path+'aeskey', 'rb') as f:
    key = f.read()

with open(path+'json_data.json') as json_file:
    b64 = json.load(json_file)

json_k = [ 'nonce', 'header', 'ciphert', 'tag' ]
json_dict = {k:b64decode(b64[k]) for k in json_k}

try:
  cipher = AES.new(key, AES.MODE_GCM,
                   nonce=json_dict['nonce'])
  cipher.update(json_dict['header'])
  pt = cipher.decrypt_and_verify(json_dict['ciphert'],
                                 json_dict['tag'])
  print("The message was: ", pt.decode('utf-8'))
except (ValueError, KeyError):
  print("Incorrect decryption")
```

```
The message was:  isifc
```