CRYPTOGRAPHIE : L'ALGORITHME SYMÉTRIQUE AES-CBC

Nous devons faire une petite excursion dans le monde magique de la cryptographie et comprendre ce qu'il se cache derrière l'acronyme **AES** et **CBC**.

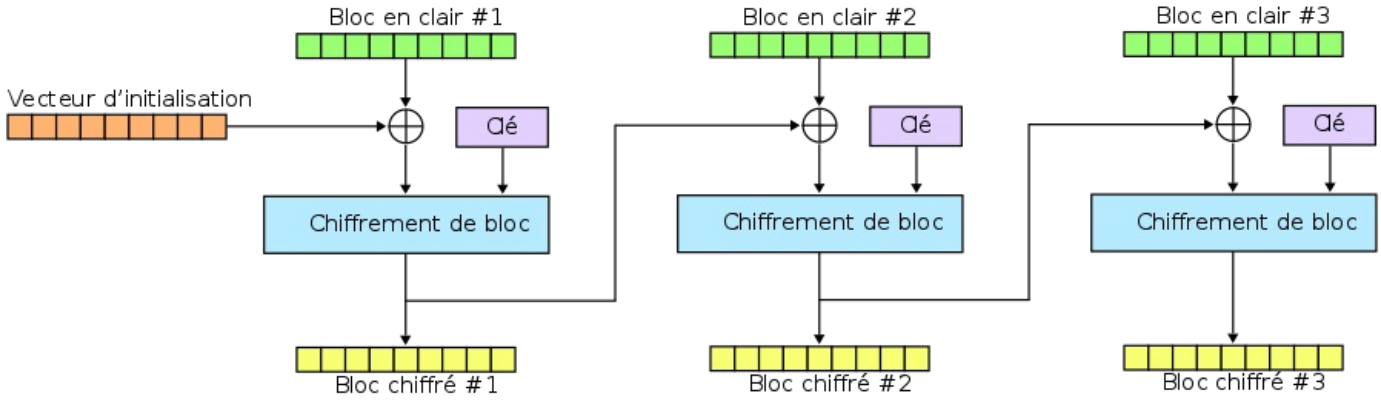
Le chiffrement **AES** est un chiffrement dit chiffrement par bloc, c'est-à-dire qu'il va découper l'ensemble de votre message non-chiffré (surnommé **plaintext** ou **en clair**) en petit morceau de plusieurs octets tous de la même taille appelés **blocs**. Chaque bloc va être chiffré un par un puis ajouté à l'ensemble du corps chiffré (surnommé **ciphertext** ou **cryptogramme**)

Le mode **CBC** est un mode d'opération particulier ajouté lors du chiffrement **AES** pour améliorer le chiffrement, et que nous verrons plus en détail en dessous.

Préambule

pour des raisons de facilité et de simplicité, dans nos exemples, chaque octet sera représenté par un caractère unique - au lieu de deux au format hexadécimal - et la clef de chiffrement sera entièrement à zéro - ce qui est une hérésie, je sais.

Un rapide résumé que nous allons voir dans ce chapitre à l'aide de ce schéma d'un encodage via **AES-CBC** :



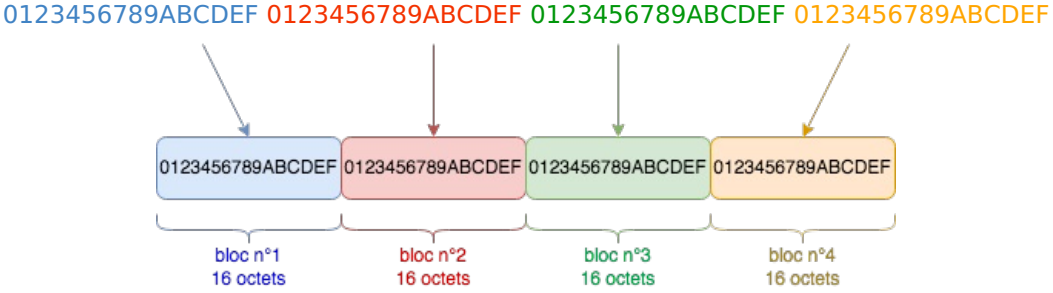
LES DIFFÉRENTES ÉTAPES D'UN CHIFFREMENT AES-CBC

Nous allons voir concrètement comment se déroule un chiffrement à l'aide de l'algorithme de chiffrement AES et de son mode d'opération CBC.

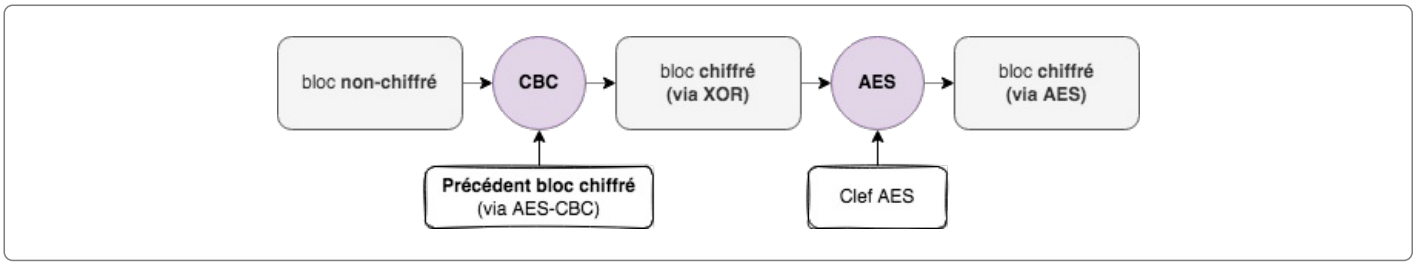
Prenons un exemple concret avec un élément de 64 octets non-chiffrés :

```
0123456789ABCDEF0123456789ABCDEF0123456789ABCDEF0123456789ABCDEF
```

Dans notre cas du AES-**128**-CBC, chaque bloc sera de 16 octets - soit 128 bits :



Schématiquement avec la cryptographie **AES-CBC**, nous allons faire ceci :



En violet, nos deux passes cryptographiques :

- Le **Cipher Block Chaining (CBC)** qui - à l'aide du résultat du **chiffrement AES-CBC du précédent bloc** - va effectuer un premier chiffrement rudimentaire.
- L'algorithme **AES** qui - à l'aide d'une **clef de chiffrement** (appelée aussi passphrase) - va terminer le chiffrement du bloc.

CBC puis AES ?

Cela peut sembler contre intuitif, mais pour un chiffrement, c'est d'abord le mode d'opération CBC qui s'applique puis AES. Lors d'un déchiffrement, cela sera effectivement AES puis CBC :)

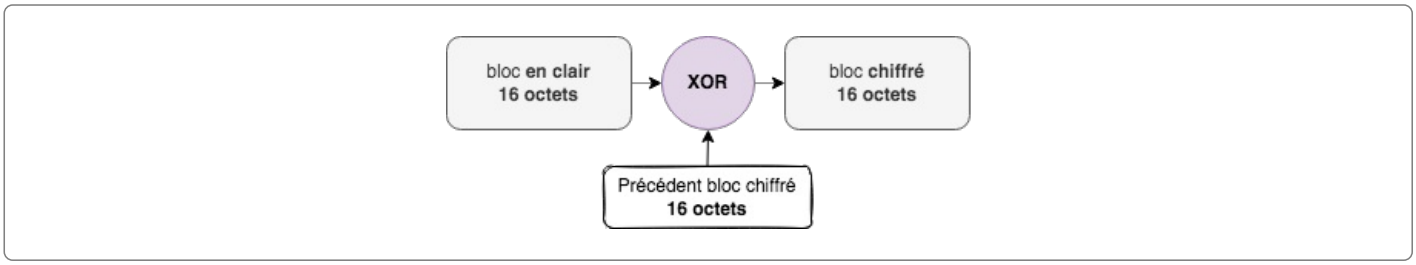
La combinaison des deux donnent un chiffrement **AES-CBC**, et le fait de manipuler tous les éléments par des blocs de 16 octets (128 bits) donne le principe et le nom complet de **AES-128-CBC**.

Nous allons voir tout ceci en détail en commençant par **Cipher Block Chaining (CBC)** :

À L'INTÉRIEUR DU CBC

Une première passe va s'appliquer sur nos données avec le mode d'opération **CBC**.

Avec le principe du **CBC**, chaque nouveau bloc en clair va être chiffré en utilisant l'opérateur logique **Ou-Exclusif** surnommé "**XOR**".



Le **XOR** (symbolisé par ⊕) est assez simple et est beaucoup utilisé en cryptographie car il permet d'effectuer un chiffrement rapide et sûr avec un des principaux opérateurs informatiques (ET / OU / NON / NON-ET / NON-OU / XOR / NON-XOR):

Bit 1	Bit 2	Résultat
0	0	**0**
0	1	**1**
1	0	**1**
1	1	**0**

Pour résumer le fonctionnement de XOR : Quand les deux bits sont différents, alors le bit de résultat est 1.

Nous allons faire un exemple de chiffrement basique en XOR avec une lettre (donc 1 octet seulement) :

- **Texte en clair** : on va prendre la lettre `T`
- **La clef** : on va utiliser la lettre `C`

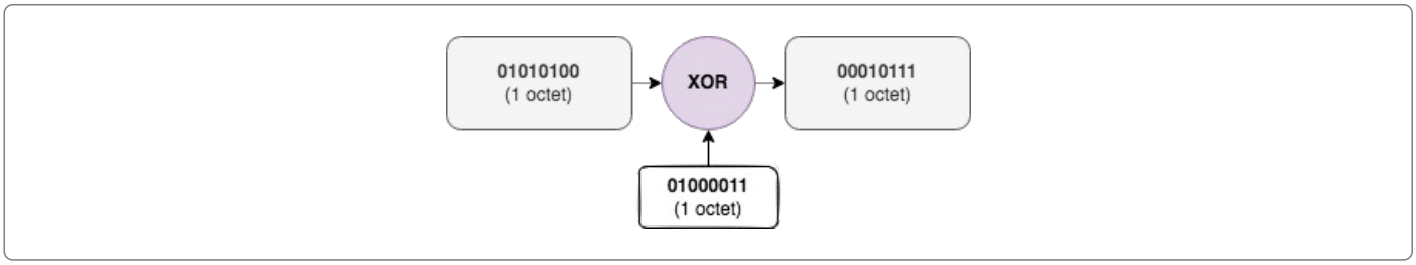
Convertissons nos lettres `T` et `C` directement en binaire :

Lettre	Binaire	Bit 1	Bit 2	Bit 3	Bit 4	Bit 5	Bit 6	Bit 7	Bit 8
`T`	`01010100`	0	1	0	1	0	1	0	0
`C`	`01000011`	0	1	0	0	0	0	1	1

Si nous appliquons un XOR pour chaque bit :

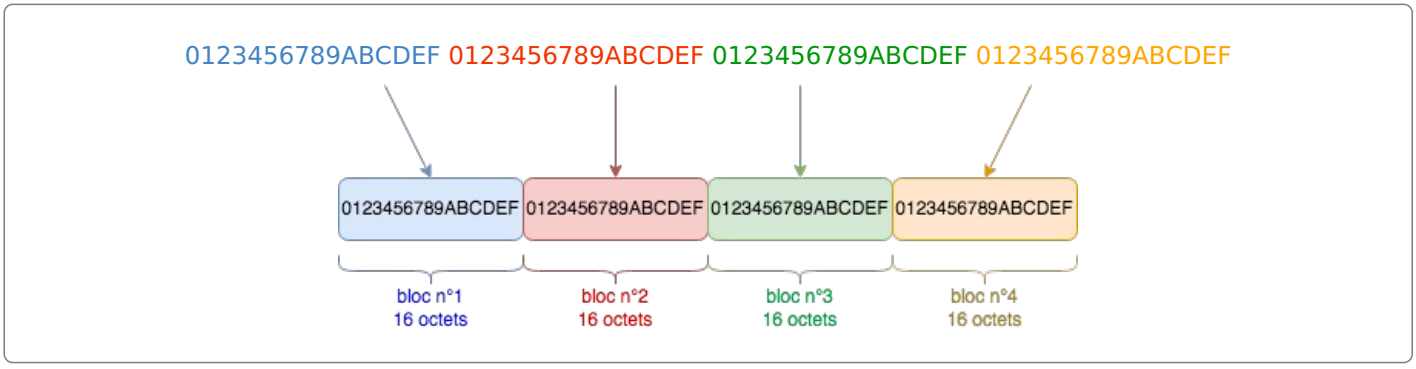
Lettre	Binaire	Bit 1	Bit 2	Bit 3	Bit 4	Bit 5	Bit 6	Bit 7	Bit 8
`T`	`01010100`	0	1	0	1	0	1	0	0
`C`	`01000011`	0	1	0	0	0	0	1	1
	Calcul XOR	0 ⊕ 0	1 ⊕ 1	0 ⊕ 0	1 ⊕ 0	0 ⊕ 0	1 ⊕ 0	0 ⊕ 1	0 ⊕ 1
	Résultat du XOR	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**1**	**1**

Notre chiffrement donnera `00010111` (`0x17` en hexadécimal).

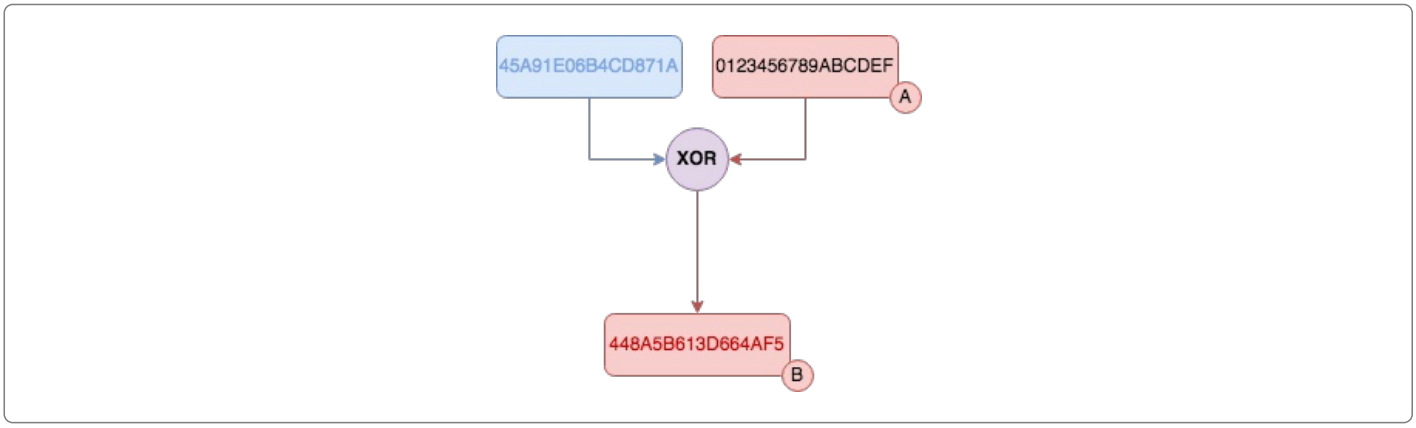


L'avantage avec la simplicité du XOR, c'est qu'en prenant notre résultat (`0x17`) et en réappliquant notre clef `C` , nous retomberons sur notre lettre `T` . C'est la beauté de la simplicité de ce **chiffrement symétrique** pouvant être opéré même sur des circuits électroniques très basiques.

Appliquons maintenant ce principe avec notre bloc rouge de 16 octets.



Nous allons chiffrer le bloc en clair (A) `0123456789ABCDEF` avec le précédent bloc bleu déjà chiffré dont le résultat AES-CBC donne `45A91E06B4CD871A` et en utilisant la fonction XOR : Ceci nous donnera notre bloc rouge (B) :



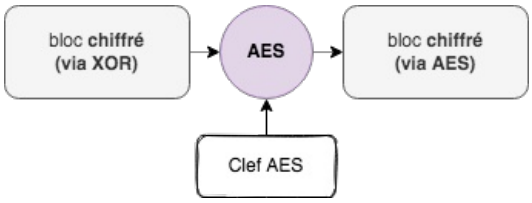
Le fait d'utiliser le résultat chiffré du précédent bloc est le principe même du **Cipher Block Chaining** : chaque

bloc chiffré sera dépendant de son prédécesseur (chaine), cela permet de renforcer la cryptographie car même en ayant les mêmes valeurs de départ dans les blocs en clair (`01234456789ABCDEF`) et avec la même clef de chiffrement AES (`0000000000000000`), **chaque bloc chiffré sera totalement différent des autres au final**.

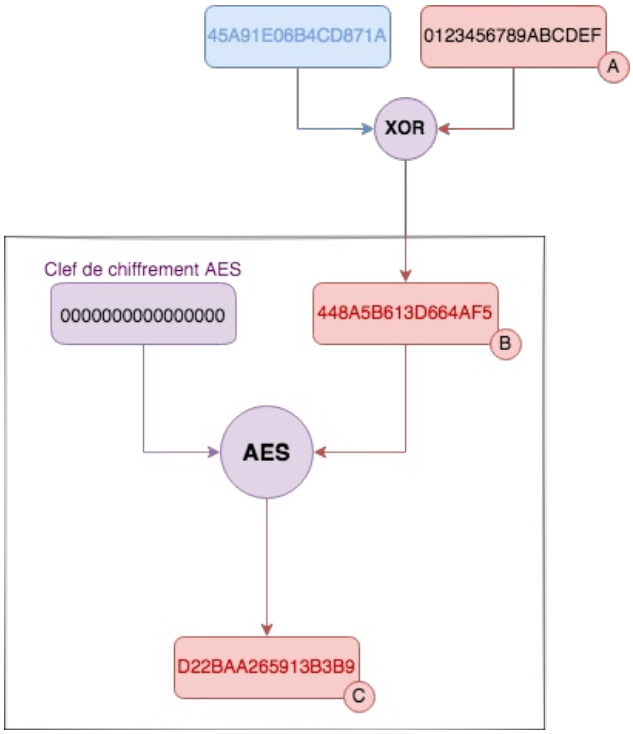
ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)

Une seconde passe va s'appliquer sur nos données avec l'algorithme **Advanced Encryption Standard (AES)**.

Maintenant que nous avons notre premier chiffrement, nous allons passer au chiffrement AES :

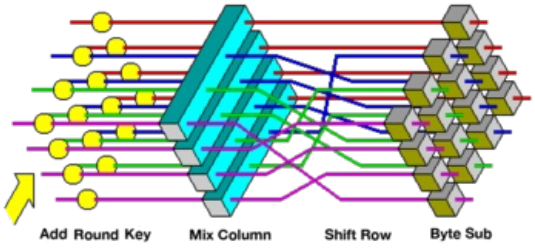


Notre bloc (B) va être une nouvelle fois chiffré mais cette fois à l'aide de l'algorithme AES :



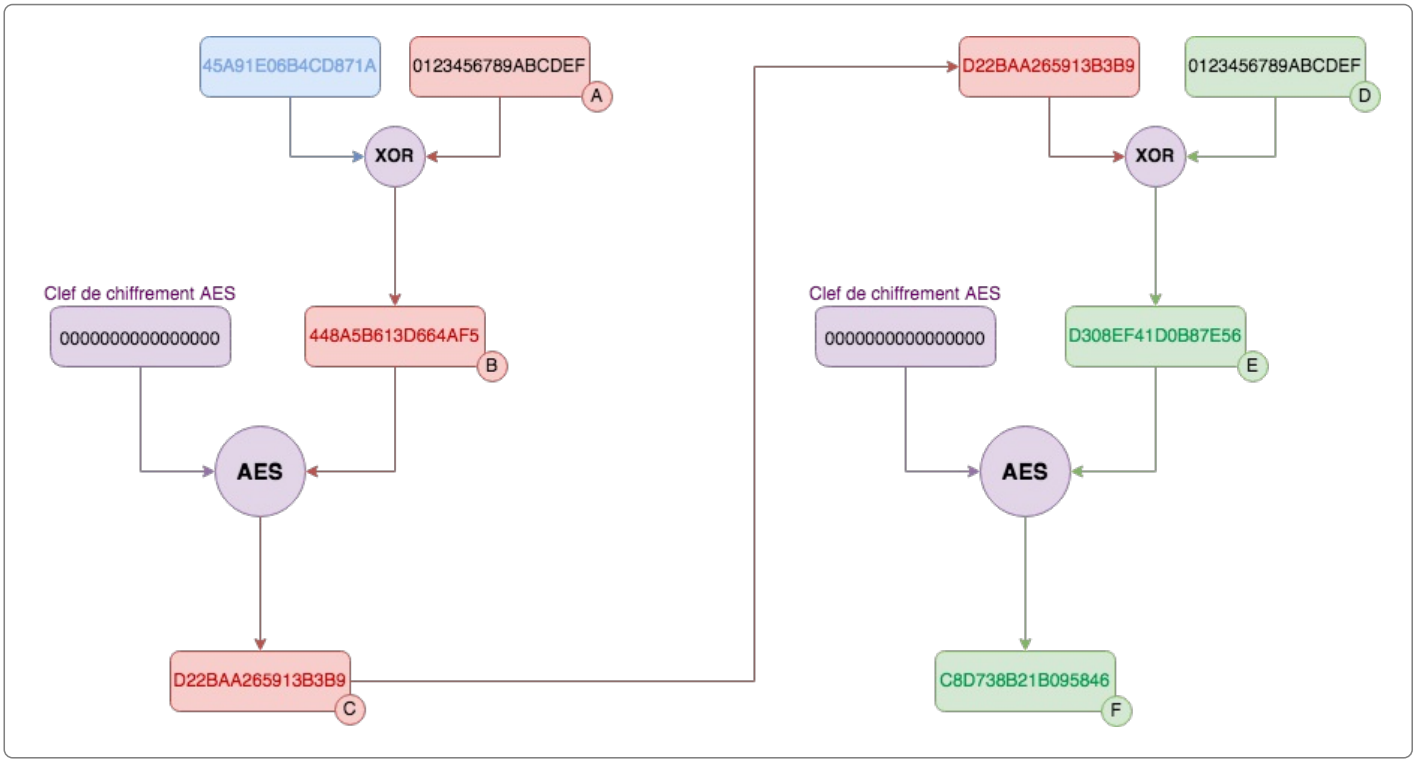
Avec l'aide de la clef de chiffrement initiale (`0000000000000000`), l'algorithme AES va appliquer des transformations (Sub, Shift, Mix, ..) sur l'ensemble du bloc B :

A l'intérieur des transformations AES



Et cela plusieurs fois (10 tours pour du 128 bits), ce qui va produire un nouveau bloc chiffré (C) et qui sera notre résultat cryptographique final : Ce bloc, entièrement en **AES-128-CBC**, sera ajouté à l'ensemble de notre contenu chiffré.

Puis nous passons au bloc suivant avec le même principe. Le résultat du bloc C servira pour le XOR de notre bloc suivant, le bloc D, en vert, pour donner le bloc chiffré E. Puis il passera par l'algorithme AES avec la même clef pour arriver au bloc chiffré final F. Et on passera au bloc suivant, et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les blocs soient chiffrés.

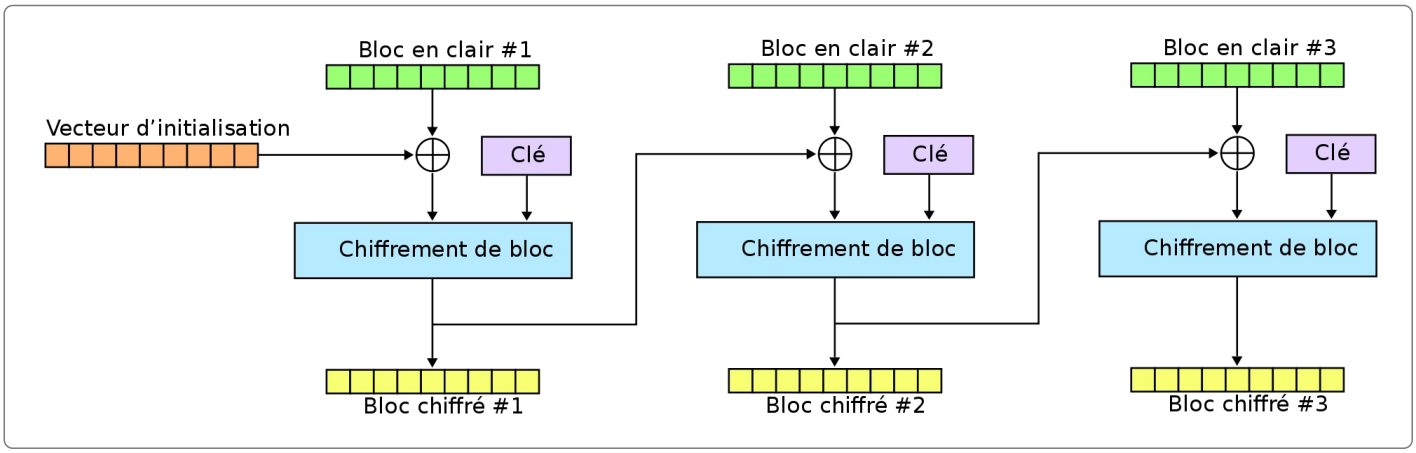


Ainsi, nous pouvons déjà dire que `D22BAA265913B3B9C8D738B21B095846` (bloc C + bloc F) est une partie de notre contenu chiffré en AES-128-CBC (en enlevant toute rigueur cryptographique à notre démonstration ;-)

« *Mais le premier bloc (bleu) n'a pas de bloc avant lui pour être utilisé lors du CBC du bloc n°1 !* »

Effectivement, pour le premier bloc, nous utilisons une petite astuce : le premier bloc sera chiffré (XOR) à l'aide d'un "faux précédent bloc" que nous aurons créé initialement nous-même et qui porte le nom de "**IV**" ou "**Initialization Vector**". C'est un bloc de 16 octets (128 bis) généré aléatoirement, il ne fait pas partie des données en clair, mais le résultat cryptographique fera partie du contenu chiffré (nous aurons besoin de cet **IV** lors du processus de déchiffrement)

Reprenons le schéma résumant ainsi ce que nous venons de voir :



Comme vous le voyez, tous les blocs s'enchaînent, sauf le premier qui utilise un vecteur d'initialisation (IV) pour son premier chiffrement.

UN EXEMPLE CONCRET

Effectuons un chiffrement complet en **AES-128-CBC** avec notre programme fait-maison pour comprendre.

Pour la facilité, la taille de notre clef, de notre IV et de notre phrase secrète seront exactement de 16 octets (128 bits).

La clef cryptographique "**UNE CLEF SECRETE**" en hexadecimal :

```
0x55 0x4E 0x45 0x20 0x43 0x4C 0x45 0x46
0x20 0x53 0x45 0x43 0x52 0x45 0x54 0x45
```

Notre **Initialization Vector (IV)** en hexadécimal :

```
0x01 0x02 0x03 0x04 0x05 0x06 0x07 0x08
0x09 0x10 0x11 0x12 0x13 0x14 0x15 0x16
```

Et enfin, notre phrase secrète "**BONJOUR LE MONDE**" en hexadécimal :

```
0x42 0x4F 0x4E 0x4A 0x4F 0x55 0x52 0x20
0x4C 0x45 0x20 0x4D 0x4F 0x4E 0x44 0x45
```

Le résultat chiffré donnera :

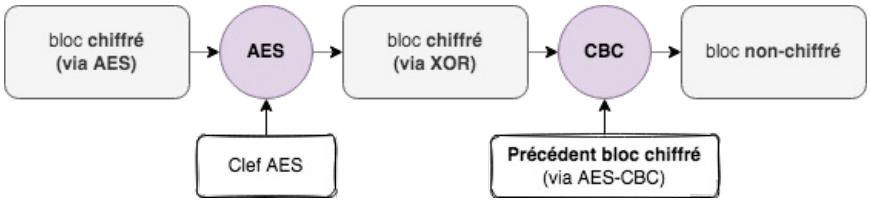
```
0xEB 0x36 0xD4 0x79 0x25 0x6C 0x9E 0x6D
0x1B 0xB4 0x11 0x52 0x6F 0x00 0x9C 0x1B
```

Et converti en texte :

```
ë6Ôy%lm´Ro
```

Ce qui ne veut rien dire, et c'est le but :-)

Pour déchiffrer, on doit faire l'inverse :



Tout d'abord, on déchiffre en AES le bloc, puis on le passe à CBC/XOR pour récupérer un bloc déchiffré, et ainsi de suite pour récupérer l'ensemble du texte non-chiffré.

EN RÉSUMÉ

Pour chiffrer et déchiffrer un contenu en AES-128-CBC, il faudra :

- **Un contenu** en clair (pour le chiffrement) ou chiffré (pour le déchiffrement)
- **Une clef** de 16 octets (128 bits)
- **Un Initialization Vector** (IV) de 16 octets (128 bits)

A partir de cela, nous pouvons entrer dans le vif du sujet : La cryptographie appliquée à notre MXF.

CHAPITRES CONNEXES

- **La cryptographie** : Pour tout savoir sur la cryptographie utilisée dans le cinéma numérique.
- **Certificats** : Les certificats utilisés dans le cinéma numérique, leurs vies, leurs oeuvres.
- **Cryptographie AES** : La cryptographie symétrique utilisée pour chiffrer les MXF.
- **Cryptographie RSA** : La cryptographie asymétrique utilisée dans les KDM pour chiffrer les clefs AES - entre autres.

RÉFÉRENCES

- Digital Cinema System Specification v1.4.3 - Chapitre 9.7.2 - Image and Sound Encryption (AES Encryption, 128 bits, CBC)
- Advanced Encryption Standard (AES) - November 26, 2001. FIPS-197