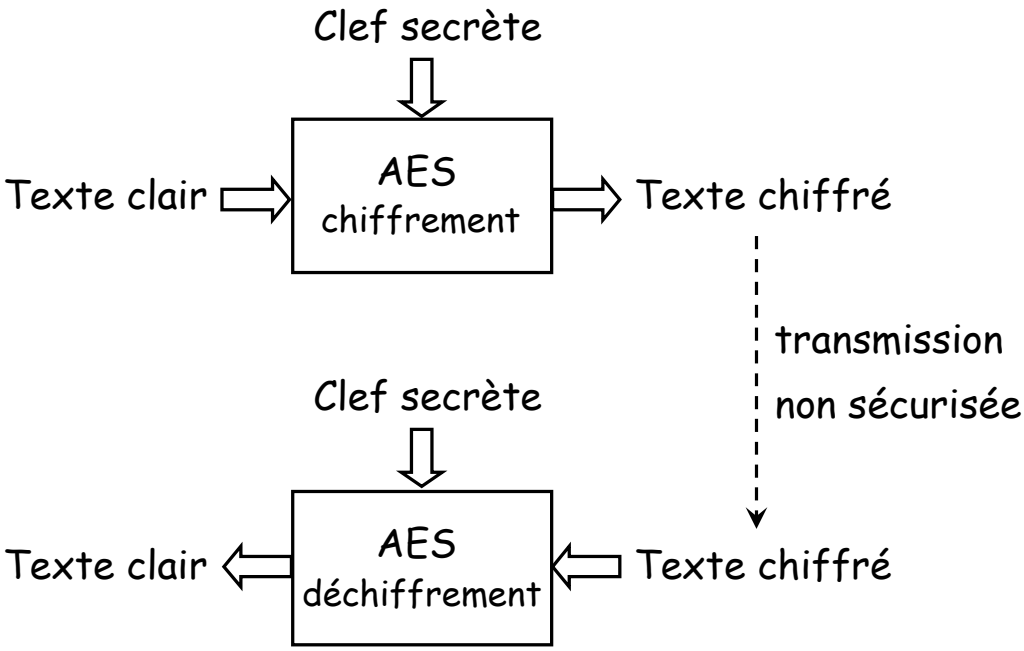
AES 128 bits.

Algorithme de chiffrement/déchiffrement symétrique (i.e. à clef secrète).

→ transmission d'un message confidentiel via un canal non sécurisé.



Une même clef secrète est utilisée pour les opérations de chiffrement et de déchiffrement (c'est un secret partagé[1] entre l'expéditeur et le destinataire du message).

AES est un algorithme de chiffrement par blocs, les données sont traitées par blocs de 128 bits pour le texte clair et le chiffré. La clef secrète a une longueur de 128 bits, d'où le nom de version : AES 128 (il existe deux autres variantes dont la clef fait respectivement 192 et 256 bits).

Bibliographie.

Les illustrations de ce document sont extraites de la norme et de l'animation d'un chiffrement AES proposée par Enrique Zabala :

- FIPS-197, *Announcing the Advanced Encryption Standard (AES)*,

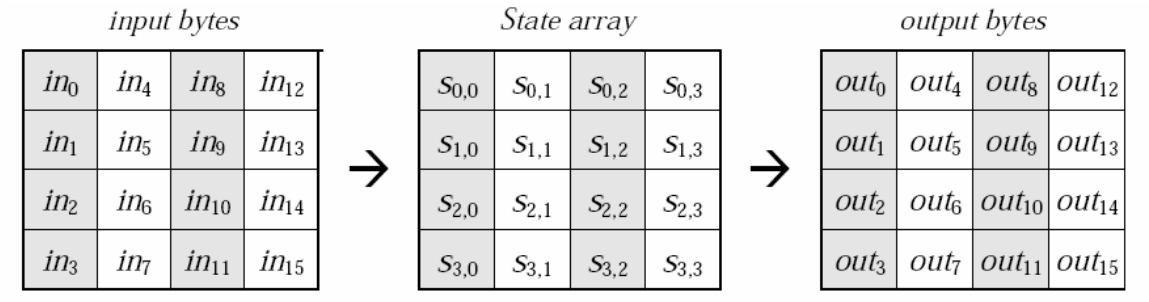
- *The Rijndael Animation*, Enrique Zabala, http://www.formaestudio.com/rijndaelinspector.

[1] Le problème de l'échange de la clef reste posé (souvent résolu grâce au recours à un algorithme de chiffrement non symétrique, i.e. à clef publique).

Conventions, indices, typage.

Convention de notation et indices de la norme :

Input bit sequence	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	…
Byte number	0								1								2								…
Bit numbers in byte	7	6	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0	…

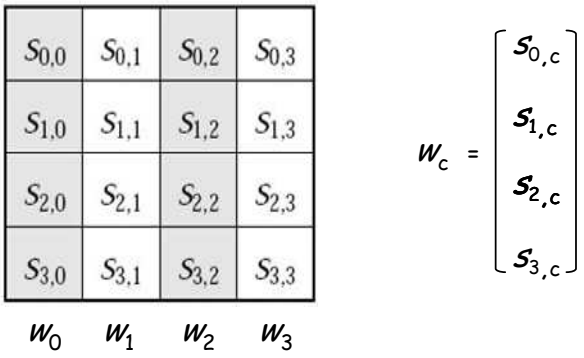


s[r,c] = in[r + 4c] out[r + 4c] = s[r,c]

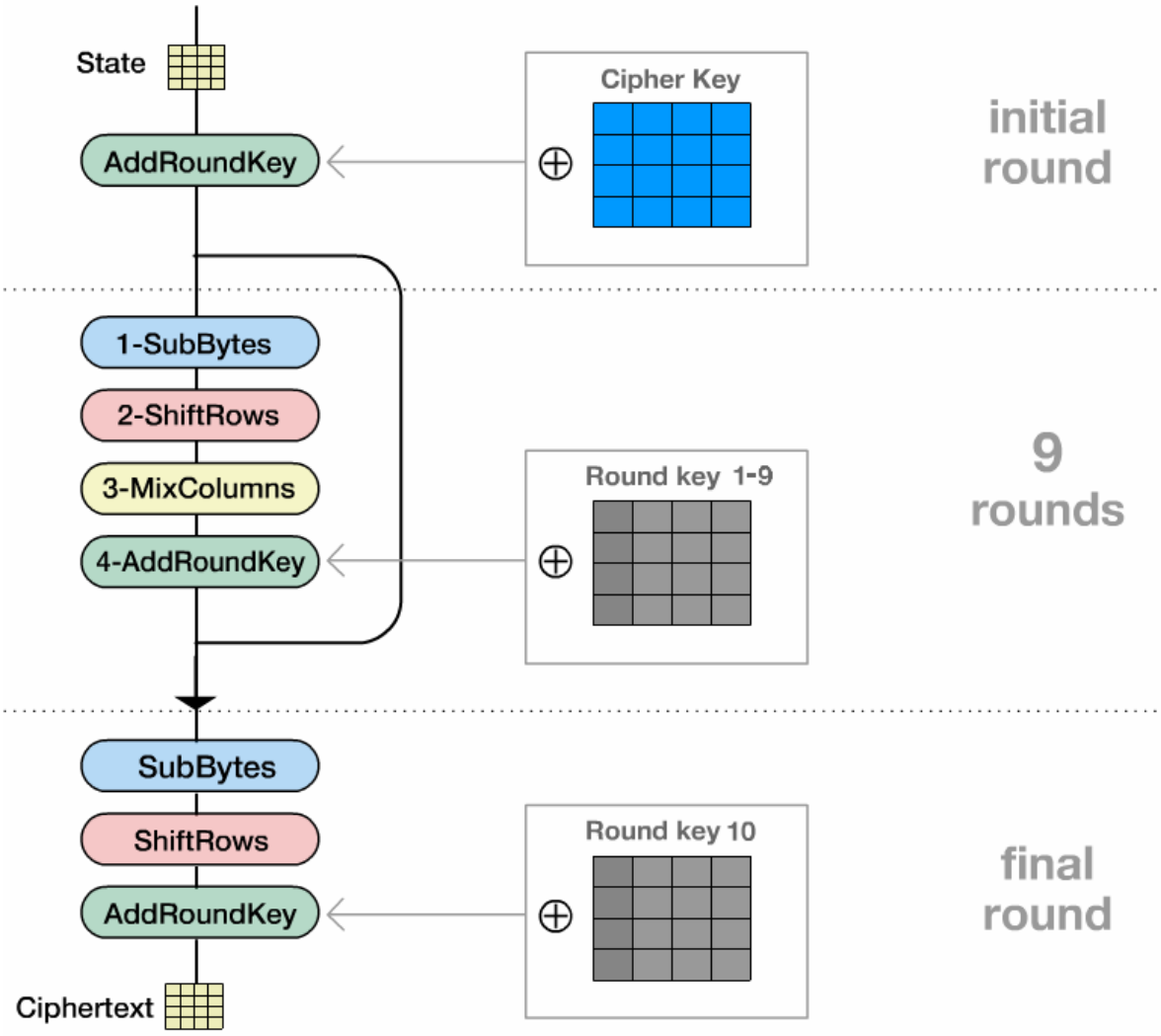
avec r *row number* $0 \le r < 4$

c *column number* $0 \le c < 4$

Un état peut également être considéré comme un tableau de colonnes, chaque colonne comprenant 4 octets / 32 bits, i.e. de mots (*word*) de 32 bits.



Chiffrement – *Cipher*.

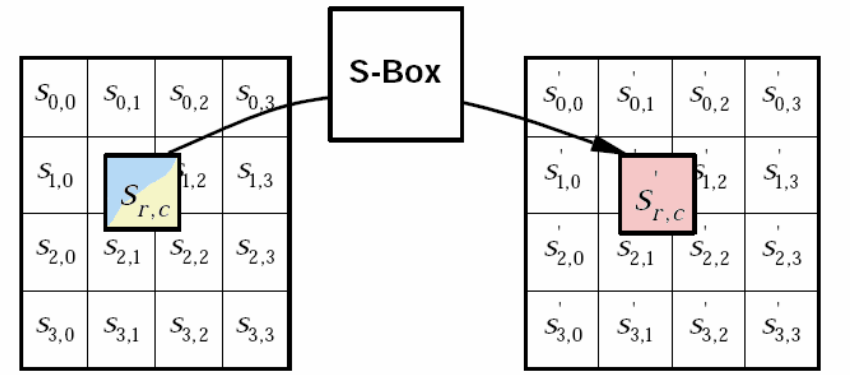



```
Cipher(byte in[4*Nb], byte out[4*Nb], word w[Nb*(Nr+1)])
begin
   byte  state[4,Nb]

   state = in

   AddRoundKey(state, w[0, Nb-1])

   for round = 1 step 1 to Nr-1
      SubBytes(state)
      ShiftRows(state)
      MixColumns(state)
      AddRoundKey(state, w[round*Nb, (round+1)*Nb-1])
   end for

   SubBytes(state)
   ShiftRows(state)
   AddRoundKey(state, w[Nr*Nb, (Nr+1)*Nb-1])

   out = state
end
```

Nb = 4 (nb colonnes)
Nr : nb de ronde
(10 pour AES 128 bits)
Nk : nb de mots de la clef

Transformation SubBytes().

→ transformation non linéaire appliquée indépendamment à chacun des octets de l'état en utilisant une table de substitution (Sbox).



Exemple : pour $s_{1,1}$ = {53}

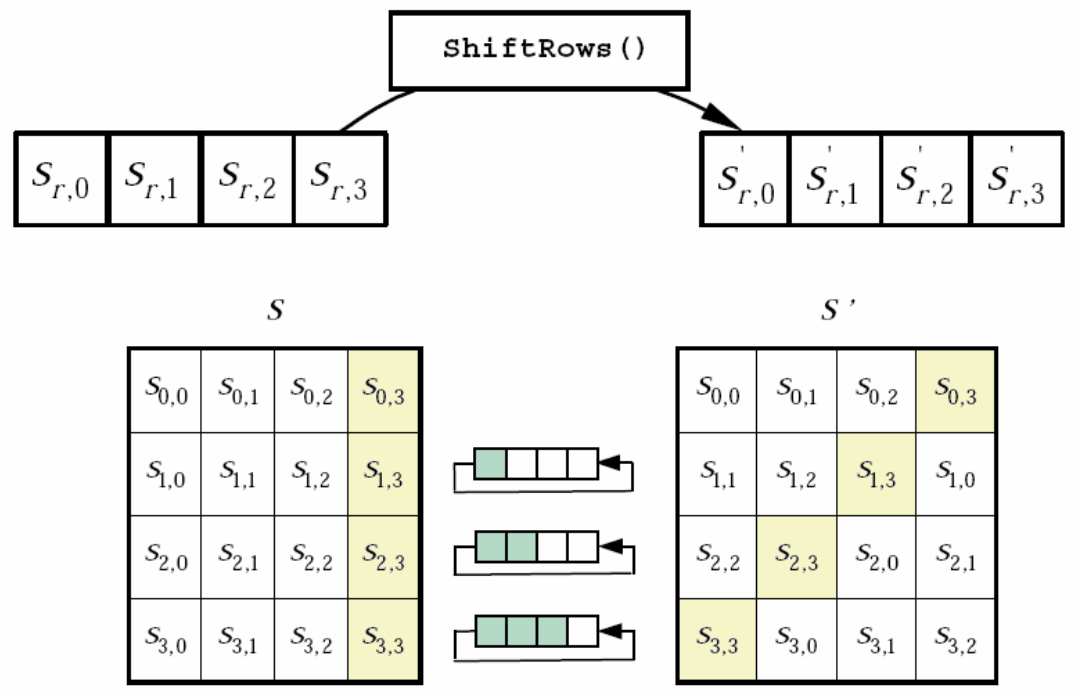
$s'_{1,1}$ = SubBytes($s_{1,1}$) = {ed}

		y															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
x	0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	01	67	2b	fe	d7	ab	76
	1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
	2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
	3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
	4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

SubBytes() est bijective sur GF(2^8).

Transformation ShiftRows().

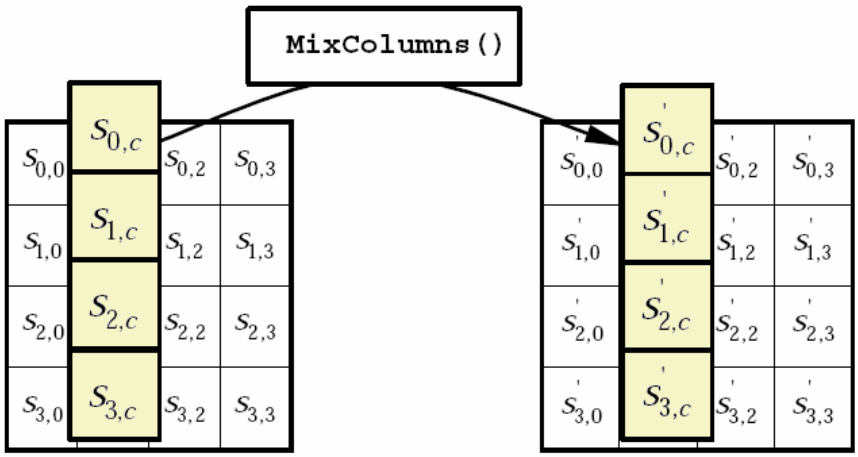
→ Permutation cyclique des octets sur les lignes de l'état. Le décalage des octets correspond à l'indice de la ligne considérée ($0 \leq r < 4$).



$$S'_{r,c} = S_{r,\,(c+r) \bmod 4}$$

Transformation MixColumns().

→ transformation appliquée à un état colonne après colonne.



C'est une transformation linéaire : un produit matriciel utilisant les 4 octets d'une colonne.
Les colonnes sont traitées comme des polynômes dans GF(2^8) et multipliées modulo $x^4 + 1$ avec les polynômes fixes donnés figure suivante :

$$\begin{bmatrix} s'_{0,c} \\ s'_{1,c} \\ s'_{2,c} \\ s'_{3,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{0,c} \\ s_{1,c} \\ s_{2,c} \\ s_{3,c} \end{bmatrix}$$

$$s'_{0,c} = (\{02\} \bullet s_{0,c}) \oplus (\{03\} \bullet s_{1,c}) \oplus s_{2,c} \oplus s_{3,c}$$
$$s'_{1,c} = s_{0,c} \oplus (\{02\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{03\} \bullet s_{2,c}) \oplus s_{3,c}$$
$$s'_{2,c} = s_{0,c} \oplus s_{1,c} \oplus (\{02\} \bullet s_{2,c}) \oplus (\{03\} \bullet s_{3,c})$$
$$s'_{3,c} = (\{03\} \bullet s_{0,c}) \oplus s_{1,c} \oplus s_{2,c} \oplus (\{02\} \bullet s_{3,c})$$

Transformation AddRoundKey().

→ ajout de la clef de ronde (ou de la clef lors de la ronde initiale) à l'état considéré (l'addition étant prise au sens ou exclusif). Un XOR (au niveau bit) est appliqué entre chacun des octets de l'état et de la clef de ronde.

XOR		
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$X \oplus 0 = X$

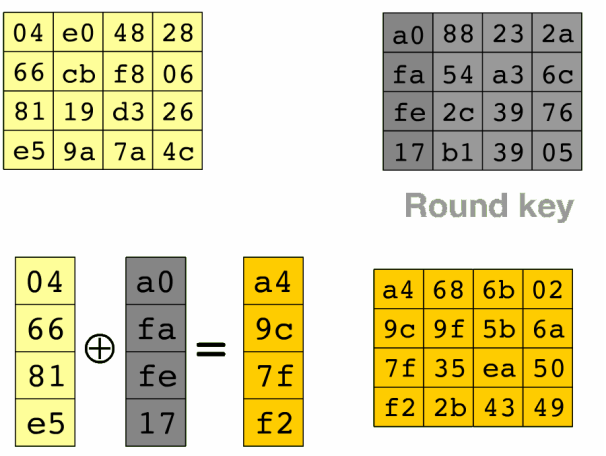
$X \oplus 1 = \text{not}(X)$

$X \oplus X = 0$

$X \oplus \text{not}(X) = 1$

$X \oplus a \oplus X = a$

Exemple :

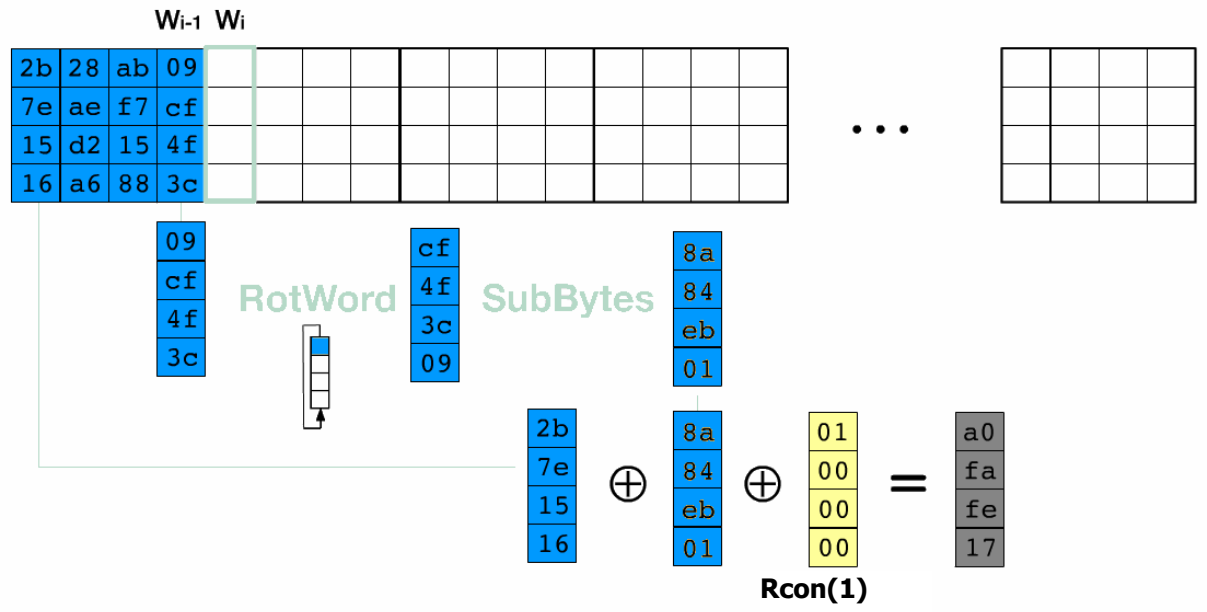


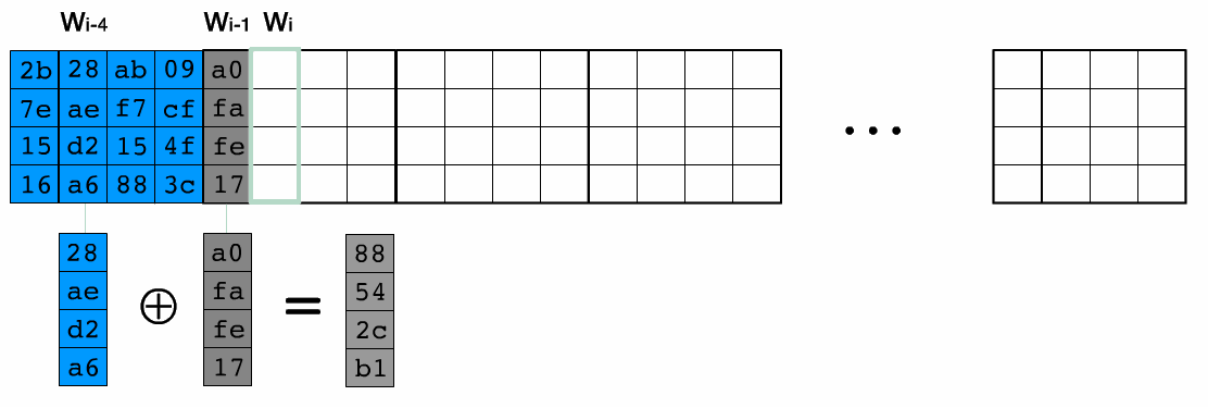
Key Expansion – Diversification de la clef.

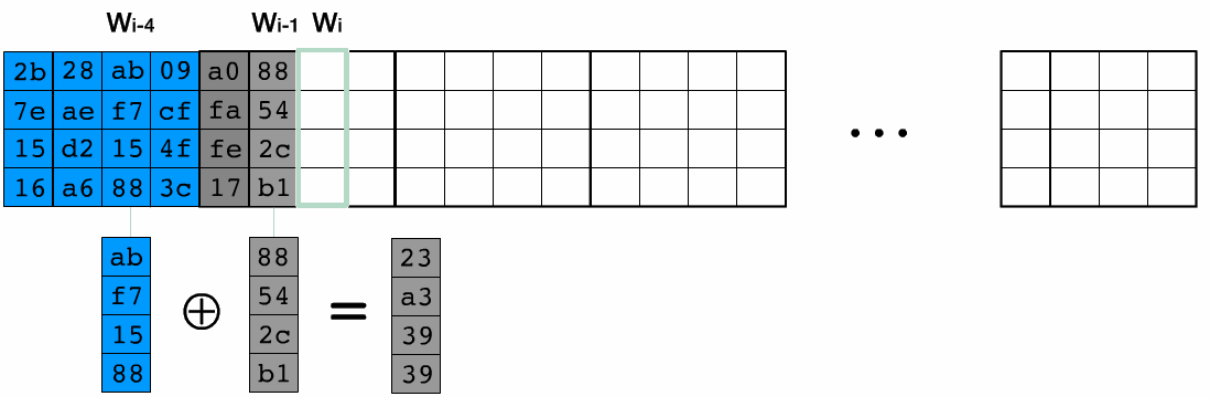
```
KeyExpansion(byte key[4*Nk], word w[Nb*(Nr+1)], Nk)
begin
   word  temp

   i = 0

   while (i < Nk)
      w[i] = word(key[4*i], key[4*i+1], key[4*i+2], key[4*i+3])
      i = i+1
   end while

   i = Nk

   while (i < Nb * (Nr+1)]
      temp = w[i-1]
      if (i mod Nk = 0)
         temp = SubWord(RotWord(temp)) xor Rcon[i/Nk]
      else if (Nk > 6 and i mod Nk = 4)
         temp = SubWord(temp)
      end if
      w[i] = w[i-Nk] xor temp
      i = i + 1
   end while
end
```

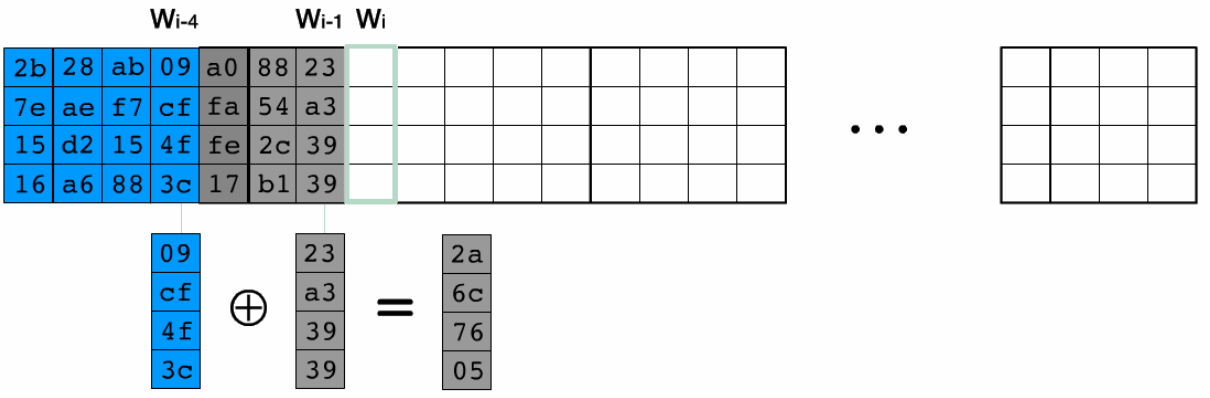
01	02	04	08	10	20	40	80	1b	36
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

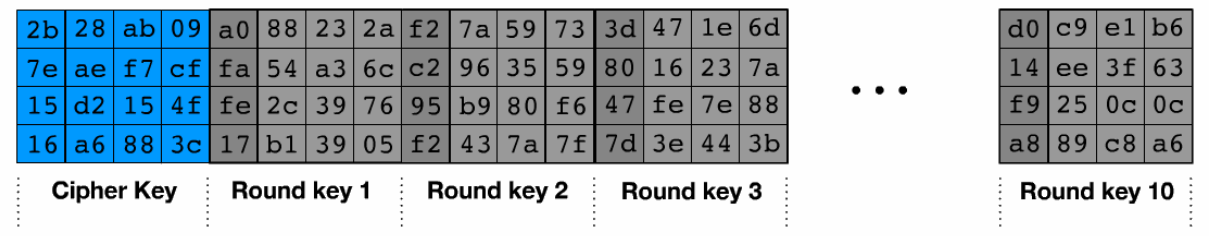
Rcon




Wi-4
Wi-1 Wi
2b 28 ab 09 a0
7e ae f7 cf fa
15 d2 15 4f fe
16 a6 88 3c 17
28 ae d2 a6
a0 fa fe 17
88 54 2c b1


Wi-4
Wi-1 Wi
2b 28 ab 09 a0 88
7e ae f7 cf fa 54
15 d2 15 4f fe 2c
16 a6 88 3c 17 b1
ab f7 15 88
88 54 2c b1
23 a3 39 39


Wi-4
Wi-1 Wi
2b 28 ab 09 a0 88 23
7e ae f7 cf fa 54 a3
15 d2 15 4f fe 2c 39
16 a6 88 3c 17 b1 39
09 cf 4f 3c
23 a3 39 39
2a 6c 76 05


2b 28 ab 09 a0 88 23 2a f2 7a 59 73 3d 47 1e 6d
7e ae f7 cf fa 54 a3 6c c2 96 35 59 80 16 23 7a
15 d2 15 4f fe 2c 39 76 95 b9 80 f6 47 fe 7e 88
16 a6 88 3c 17 b1 39 05 f2 43 7a 7f 7d 3e 44 3b
d0 c9 e1 b6
14 ee 3f 63
f9 25 0c 0c
a8 89 c8 a6
Cipher Key
Round key 1
Round key 2
Round key 3
Round key 10

Inverse Cipher.

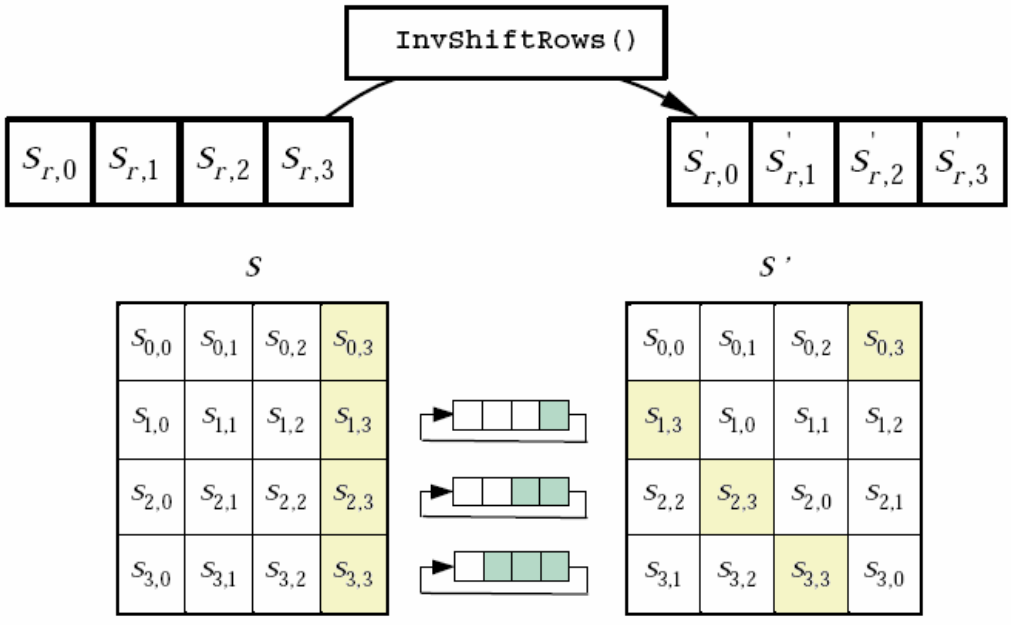
```
InvCipher(byte in[4*Nb], byte out[4*Nb], word w[Nb*(Nr+1)])
begin
   byte  state[4,Nb]

   state = in

   AddRoundKey(state, w[Nr*Nb, (Nr+1)*Nb-1])

   for round = Nr-1 step -1 downto 1
      InvShiftRows(state)
      InvSubBytes(state)
      AddRoundKey(state, w[round*Nb, (round+1)*Nb-1])
      InvMixColumns(state)
   end for

   InvShiftRows(state)
   InvSubBytes(state)
   AddRoundKey(state, w[0, Nb-1])

   out = state
end
```

Les clefs de ronde sont utilisées dans l'ordre inverse de celui du chiffrement.

On notera que l'ordre des transformations diffère de celui du Cipher.

→ le déchiffrement consiste à appliquer dans l'ordre inverse du chiffrement les transformations inverses correspondantes (*"détricoter le chiffrement"*).

InvShiftRows().



InvSubBytes().

→ inverse de la transformation SubBytes().

x \ y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
0	52	09	6a	d5	30	36	a5	38	bf	40	a3	9e	81	f3	d7	fb
1	7c	e3	39	82	9b	2f	ff	87	34	8e	43	44	c4	de	e9	cb
2	54	7b	94	32	a6	c2	23	3d	ee	4c	95	0b	42	fa	c3	4e
3	08	2e	a1	66	28	d9	24	b2	76	5b	a2	49	6d	8b	d1	25
4	72	f8	f6	64	86	68	98	16	d4	a4	5c	cc	5d	65	b6	92
5	6c	70	48	50	fd	ed	b9	da	5e	15	46	57	a7	8d	9d	84
6	90	d8	ab	00	8c	bc	d3	0a	f7	e4	58	05	b8	b3	45	06
7	d0	2c	1e	8f	ca	3f	0f	02	c1	af	bd	03	01	13	8a	6b
8	3a	91	11	41	4f	67	dc	ea	97	f2	cf	ce	f0	b4	e6	73
9	96	ac	74	22	e7	ad	35	85	e2	f9	37	e8	1c	75	df	6e
a	47	f1	1a	71	1d	29	c5	89	6f	b7	62	0e	aa	18	be	1b
b	fc	56	3e	4b	c6	d2	79	20	9a	db	c0	fe	78	cd	5a	f4
c	1f	dd	a8	33	88	07	c7	31	b1	12	10	59	27	80	ec	5f
d	60	51	7f	a9	19	b5	4a	0d	2d	e5	7a	9f	93	c9	9c	ef
e	a0	e0	3b	4d	ae	2a	f5	b0	c8	eb	bb	3c	83	53	99	61
f	17	2b	04	7e	ba	77	d6	26	e1	69	14	63	55	21	0c	7d

Pour $s_{i,j} = \{ed\}$

$s'_{i,j} = \text{InvSubBytes}(s_{i,j}) = \{53\}$

InvMixColumns().

$$\begin{bmatrix} s'_{0,c} \\ s'_{1,c} \\ s'_{2,c} \\ s'_{3,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0e & 0b & 0d & 09 \\ 09 & 0e & 0b & 0d \\ 0d & 09 & 0e & 0b \\ 0b & 0d & 09 & 0e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{0,c} \\ s_{1,c} \\ s_{2,c} \\ s_{3,c} \end{bmatrix}$$

$$s'_{0,c} = (\{0e\} \bullet s_{0,c}) \oplus (\{0b\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{0d\} \bullet s_{2,c}) \oplus (\{09\} \bullet s_{3,c})$$

$$s'_{1,c} = (\{09\} \bullet s_{0,c}) \oplus (\{0e\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{0b\} \bullet s_{2,c}) \oplus (\{0d\} \bullet s_{3,c})$$

$$s'_{2,c} = (\{0d\} \bullet s_{0,c}) \oplus (\{09\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{0e\} \bullet s_{2,c}) \oplus (\{0b\} \bullet s_{3,c})$$

$$s'_{3,c} = (\{0b\} \bullet s_{0,c}) \oplus (\{0d\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{09\} \bullet s_{2,c}) \oplus (\{0e\} \bullet s_{3,c})$$

Equivalent Inverse Cipher.

→ version utilisant un ordre des transformations identique à celui du Cipher (chaque transformation étant remplacée par son inverse).

Propriétés algorithmiques :

1. Il est possible d'inverser l'ordre des transformation SubBytes() et ShiftRows(), et également pour InvSubBytes() et InvShiftRows().
2. Les transformations MixColumns() et InvMixColumns() sont linéaires vis-à-vis de la colonne d'entrée, c'est-à-dire :

InvMixColumns(state XOR RoundKey) =

InvMixColumns(state) XOR InvMixColumns(RoundKey)

```
EqInvCipher(byte in[4*Nb], byte out[4*Nb], word dw[Nb*(Nr+1)])
begin
   byte  state[4,Nb]

   state = in

   AddRoundKey(state, dw[Nr*Nb, (Nr+1)*Nb-1])

   for round = Nr-1 step -1 downto 1
      InvSubBytes(state)
      InvShiftRows(state)
      InvMixColumns(state)
      AddRoundKey(state, dw[round*Nb, (round+1)*Nb-1])
   end for

   InvSubBytes(state)
   InvShiftRows(state)
   AddRoundKey(state, dw[0, Nb-1])

   out = state
end


For the Equivalent Inverse Cipher, the following pseudo code is added at
the end of the Key Expansion routine (Sec. 5.2):
   for i = 0 step 1 to (Nr+1)*Nb-1
      dw[i] = w[i]
   end for


   for round = 1 step 1 to Nr-1
      InvMixColumns(dw[round*Nb, (round+1)*Nb-1])     //  note  change  of
type
   end for
```