

Arithmétique en binaire

Chouette, des maths...

Comme nous l'avons vu, il est possible de convertir n'importe quel nombre entier positif exprimé en base 10 en un nombre binaire, c'est-à-dire en base 2.

Une fois que nous avons les nombres exprimés en binaire, il est normal de vouloir faire des opérations dessus, sans repasser par le base 10.

Nous allons principalement travailler sur l'addition. La table d'addition ci-dessous donne le résultat de l'addition de nombres à un seul chiffre :

+	0	1
0	0	1
1	1	10

Il y a une retenue dans le cas $1 + 1$, et uniquement dans ce cas.

Pour additionner deux nombres à plusieurs chiffres, il faut commencer par rajouter des 0 à gauche du plus court des deux et ensuite, on fait l'addition chiffre par chiffre, en partant de la droite et en faisant attention aux retenues. Voici quelques exemples :

$$\begin{array}{r}
 \textcolor{red}{1} \\
 01 \\
 + 01 \\
 \hline
 10
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 \textcolor{red}{11} \\
 0011 \\
 + 1001 \\
 \hline
 1100
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 0101 \\
 + 1010 \\
 \hline
 1111
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 \textcolor{red}{1} \quad \textcolor{red}{1} \\
 0101 \\
 + 0101 \\
 \hline
 1010
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 \textcolor{red}{1111} \\
 01111 \\
 + 00001 \\
 \hline
 10000
 \end{array}$$

EXERCICE 1 : Effectuer les additions suivantes :

$$\begin{array}{r}
 110 \\
 + 1 \\
 \hline
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 101 \\
 + 11 \\
 \hline
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1100 \\
 + 0011 \\
 \hline
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1011 \\
 + 1000 \\
 \hline
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1000 \\
 + 1000 \\
 \hline
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1111 \\
 + 1111 \\
 \hline
 \end{array}$$

Pour la suite, nous appellerons **bits**, les chiffres des nombres écrits en binaire.

On peut remarquer quelques propriétés :

- Un nombre binaire de la forme $10 \dots 0$ correspond à une puissance de 2. S'il a k bits, alors le nombre est égal à 2^{k-1} .
- Un nombre binaire de la forme $1 \dots 1$, avec k fois le bit 1 est égal à $2^k - 1$.
- Ajouter un 0 à la fin d'un nombre revient à le multiplier par 2.
- Pour déterminer le nombre de bits qu'il faut pour représenter le nombre n , il faut trouver l'entier k tel que $2^{k-1} \leq n < 2^k$. Il faut alors k bits pour représenter n .

D'après les résultats précédents, nous en déduisons qu'avec k bits, il est possible de représenter 2^k nombres. Si on représente les nombres positifs, cela correspond aux nombres de 0 à $2^k - 1$. Ci-contre se trouve la table des 16 entiers positifs pouvant être écrits avec 4 bits. Mais comment faire pour les nombres négatifs ?

Base 10	Base 2
00	0000
01	0001
02	0010
03	0011
04	0100
05	0101
06	0110
07	0111
08	1000
09	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111

Qui peut le plus, peut le moins

Une première méthode consiste simplement à utiliser le bit le plus à gauche pour indiquer le signe. Ainsi, sur 4 bits, 3 est représenté par 0011, donc -3 sera représenté par 1011.

EXERCICE 2 : Compléter le tableau ci-contre en calculant la représentation des entiers négatifs.

Cette représentation très simple pose néanmoins plusieurs problèmes. Tout d'abord, si on fait la somme $-3+3$, on aimerait trouver 0.

$$\begin{array}{r} 111 \\ + 0011 \\ \hline 1110 \end{array}$$

On remarque qu'on ne trouve pas 0, mais -6.

De plus, avec 4 bits, il est possible de représenter les entiers de -7 à 7. Cela ne fait que 15 valeurs différentes, en comptant 0. C'est parce qu'il est possible d'écrire -0 avec 1000. Ce n'est donc pas une solution satisfaisante.

Base 10	Binaire
-7	
-6	
-5	
-4	
-3	
-2	
-1	1001
-0	1000
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

On va essayer de faire un peu mieux

Un deuxième méthode consiste à inverser les bits du nombre. Par exemple, si on prend des nombres de 4 bits, 5 s'écrit 0101. On peut représenter -5 par 1010. C'est ce qu'on appelle le **complément à un**, puisque pour chaque bit, on choisit celui qui permet que la somme des deux soit 1. On remarque que les premiers nombres positifs ont leur bit à gauche qui vaut 0 alors que leurs opposés ont un 1. On retrouve le bit de signe de la première méthode.

EXERCICE 3 : Compléter le tableau ci-contre en calculant la représentation des entiers négatifs.

Une nouvelle fois, on a deux façons d'écrire 0, avec 0000 et 1111. C'est un des problèmes de cette méthode. Une des opérations de base pour un processeur, c'est de tester si un nombre est nul. Avec cette représentation, il faut donc tester si le nombre n'est composé que de 0 ou que de 1. Ce n'est pas une solution optimale. Par contre, la somme de deux nombres opposés donne toujours 1111, ce qui correspond bien à 0.

Base 10	Compl. à 1
-7	
-6	
-5	
-4	
-3	
-2	1101
-1	1110
-0	1111
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

Complément à deux

La solution retenue pour représenter les entiers relatifs dans la plupart des systèmes s'appelle le **complément à deux**. Il existe plusieurs façons de la définir.

L'idée principale est de garantir que la somme d'un nombre et de son opposé donne 0. Prenons la représentation de 3 sur 4 bits : 0011. On veut trouver le nombre qui vérifie l'égalité ci-contre.

$$\begin{array}{r} 0011 \\ + ???? \\ \hline 0000 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 0011 \\ + 1100 \\ \hline 1111 \end{array}$$
$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}$$
$$\begin{array}{r} + 1101 \\ \hline 0000 \end{array}$$

Base 10	Compl. à 2
-8	1000
-7	1001
-6	1010
-5	1011
-4	1100
-3	1101
-2	1110
-1	1111
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

Pour obtenir la version binaire en complément à deux de -37 , il faut convertir 37 en binaire, ce qui donne 00100101_2 . On fait le complément à 1 : 11011010_2 . Enfin, il faut rajouter 1 pour obtenir : $-37 = 11011011_2$.

[illegible]

Pour convertir du binaire vers la base 10, il faut regarder le bit de gauche :

- Si le nombre commence par 0, on le convertit normalement.
- Si le nombre commence par 1, on fait le complément à un et on ajoute 1 pour obtenir l'opposé du nombre. Il suffit alors de rajouter le signe $-$.

Ainsi, pour obtenir la valeur en base 10 de 11011011_2 , on inverse les bits puisqu'il commence par 1. On rajoute 1 et on obtient $00100101_2 = 37$. On en déduit que $11011011_2 = -37$.

EXERCICE 5 : Déterminer le nombre en base 10 correspondant à chacun des nombres suivants qui utilisent le complément à deux sur 8 bits.

- 1) $11111010 =$
- 2) $00010110 =$
- 3) $00011111 =$
- 4) $10111111 =$
- 5) $10101001 =$
- 6) $01111110 =$

Si on place sur un cercle les nombres entiers, leur représentation binaire et les nombres correspondant en complément à deux, on obtient le diagramme ci-contre.

On remarque que si on continuait le tour, le nombre 16 se trouverait sur 0. C'est parce que si on ne garde que 4 bits, 10000 devient 0000 . De plus, si on prend un nombre positif avec la même écriture binaire qu'un nombre négatif et qu'on soustrait les deux, on obtient 16 :

$$15 - (-1) = 14 - (-2) = \dots = 8 - (-8) = 16$$

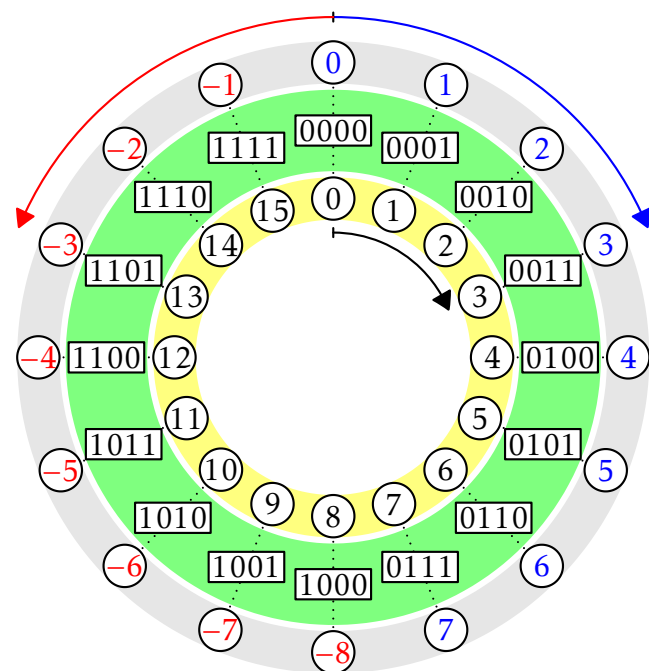
On obtient une autre méthode pour trouver le complément à deux de $-n$ sur k bits, avec n positif. Il suffit de prendre la représentation binaire du nombre $2^k - n$. Sur 4 bits, l'opposé de 7 correspond donc à :

$$2^4 - 7 = 16 - 7 = 9 = 1001_2$$

On peut utiliser cette méthode pour passer de l'écriture en binaire sur k bits à l'écriture en base 10.

Cela revient aussi à considérer que le bit de gauche correspond à -2^{k-1} . Pour la méthode de Horner, on peut multiplier par -1 le premier bit pour obtenir le même résultat.

	128	64	32	16	8	4	2	1
Il est négatif	1	1	0	1	1	0	1	1
On inverse les bits	0	0	1	0	0	1	0	0
On ajoute 1 ($\rightarrow 37$)	0	0	1	0	0	1	0	1



Il était une fois...

Il existe plusieurs façons de faire les multiplications en binaire. On peut simplement “dépiler” un des deux facteurs :

$$A \times B = \underbrace{A + A + A + \dots + A}_{B \text{ fois}}$$

Nous allons plutôt poser les multiplications, comme “à l’école”. Commençons avec des nombres positifs, dans l’exemple ci-contre.

$$\begin{array}{r} 1101 \\ \times 1011 \\ \hline 1101 \\ 1101 \\ 0000 \\ 1101 \\ \hline 10001111 \end{array}$$

Le résultat obtenu a 8 bits. C’est parce que lors d’une multiplication de deux nombres de k bits, on peut obtenir un résultat à $2k$ bits.

On peut noter que la multiplication est relativement simple à poser puisqu’à chaque bit du nombre du bas, si c’est un 1, on recopie le nombre de haut, sinon on met des 0. Il n’y a donc aucune multiplication à faire, juste des additions.

EXERCICE 6 : Vérifier le résultat de la multiplication précédente en convertissant les nombres en base 10.

EXERCICE 7 : Effectuer les multiplications ci-dessous :

$\begin{array}{r} 0011 \\ \times 0011 \\ \hline \\ \\ \\ \end{array}$	$\begin{array}{r} 1100 \\ \times 0101 \\ \hline \\ \\ \\ \end{array}$	$\begin{array}{r} 1011 \\ \times 1001 \\ \hline \\ \\ \\ \end{array}$	$\begin{array}{r} 1111 \\ \times 1111 \\ \hline \\ \\ \\ \end{array}$
---	---	---	---

Pour les nombres relatifs, c’est un peu plus compliqué. Tout d’abord on étudie le signe des deux facteurs A et B :

- Si $A > 0$ et $B > 0$, on pose $A \times B$, selon la méthode ci-dessus.
- Si $A < 0$ et $B > 0$, on pose $A \times B$, selon la méthode présentée ci-dessous.
- Si $A > 0$ et $B < 0$, on pose $B \times A$, selon la méthode présentée ci-dessous.
- Si $A < 0$ et $B < 0$, on pose $(-A) \times (-B)$, selon la méthode ci-dessus.
- Si l’un des deux est nul, le résultat est 0.

Si le premier nombre est négatif, on complète avec k bits devant chacun des nombres en recopiant le bit de gauche à chaque fois. C’est-à-dire qu’on met des 1 pour un nombre négatif et des 0 pour un nombre positif. On pose ensuite la multiplication en ne gardant que les $2k$ derniers bits.

Par exemple pour faire 1100×0101 , on pose la multiplication ci-contre.

Cette multiplication correspond à -3×5 . Le nombre obtenu est bien négatif. Il est exprimé sur 8 bits. On inverse les bits et on trouve 00001110. On ajoute 1 et on obtient 0001111, qui correspond à 15. Le résultat de la multiplication était bien -15 .

En fait, il est possible de poser la multiplication de n’importe quels entiers relatifs en complétant à gauche les bits de signe, mais la méthode présentée permet de simplifier les multiplications obtenues.

$$\begin{array}{r} 11111101 \\ \times 00000101 \\ \hline 11111101 \\ 00000000 \\ 11110100 \\ 00000000 \\ \hline 11110001 \end{array}$$

EXERCICE 8 : Déterminer le résultat des multiplications suivantes, entre nombre relatifs exprimés sur 4 bits.

- 1) 0011×1001 2) 1011×0110 3) 1111×1111

Ce n’est pas ainsi que les multiplications sont effectuées par les processeurs. Il existe des techniques bien plus rapides, mais plus complexes à comprendre.

Exercices d'entraînement

EXERCICE 9 : Effectuer les additions suivantes sur les nombres binaires indiqués

$$\begin{array}{r} 1) \quad 01101111 \\ + 01000010 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 2) \quad 00110001 \\ + 10001111 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 3) \quad 00110010 \\ + 01001110 \\ + 01000111 \\ \hline \end{array}$$

Pour les deux exercices suivants, vous pouvez recopier et compléter le tableau suivant :

	128	64	32	16	8	4	2	1

EXERCICE 10 : Convertir les nombres suivants en complément à 2 sur 8 bits.

$$1) -123 =$$

$$2) 37 =$$

$$3) -92 =$$

$$4) 106 =$$

$$5) -21 =$$

$$6) 99 =$$

EXERCICE 11 : Convertir en base 10 les nombres suivants exprimés en complément à 2 sur 8 bits.

$$1) 11001010_2 =$$

$$2) 10001011_2 =$$

$$3) 01100001_2 =$$

$$4) 11111101_2 =$$

$$5) 00001110_2 =$$

$$6) 10110110_2 =$$

EXERCICE 12 : Pour cet exercice, on considère des nombres exprimés en complément à 2 sur 10 bits.

1) Quel est le plus petit et le plus grand nombre qui peut être exprimé?

2) Comment s'écrivent ces deux nombres en complément à 2?

3) Comment s'écrit -1_{10} en complément à 2?

4) Comment s'écrivent 16, 32 et 64 en complément à 2?

Corrections

EXERCICE 9 :

$$1) 11010011_2$$

$$2) 11000001_2$$

$$3) 10110001_2$$

EXERCICE 10 :

$$1) 11000110_2$$

$$2) 11101011_2$$

$$3) 01101010_2$$

$$4) 10100100_2$$

$$5) 01100001_2$$

$$6) 10000101_2$$

EXERCICE 11 :

$$1) -74$$

$$2) 14$$

$$3) -3$$

$$4) 97$$

$$5) -17$$

$$6) -54$$

EXERCICE 12 :

$$1) 16 = 11111000_2, 32 = 111110000_2 \text{ et } 64 = 1111100000_2.$$

$$2) -1 = 11111111_2.$$

$$3) -512 = 1000000001_2 \text{ et } 511 = 011111111_2.$$

$$4) \text{ De } -512 \text{ à } 511.$$